



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

**AUTOMATIZACIÓN DEL CONTROL DE LA
ENERGÍA Y FOCALIZACIÓN DE UN CAÑÓN DE
ELECTRONES PARA ESTUDIOS DE LA EMISIÓN DE
ELECTRONES SECUNDARIOS**

PROYECTO FIN DE CARRERA
INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL ELECTRÓNICA

AUTOR: PABLO OLIVA GÓMEZ
TUTORES: INMACULADA COLERA GARZÓN
MIGUEL TARDÍO LÓPEZ
JULIO, 2009

AGRADECIMIENTOS:

A mis tutores Inmaculada Cólera Garzón y Miguel Tardío López por haberme brindado la posibilidad de realizar este proyecto y por su ayuda y dedicación.

Al Departamento de Física de la Universidad Carlos III de Madrid por permitirme la presentación del proyecto en dicho departamento.

A mis padres por su apoyo y su paciencia durante toda la carrera.

A todos los amigos con los que he compartido victorias y derrotas y que hicieron mucho más fáciles todos estos años.



ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	i
ÍNDICE DE FIGURAS	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE ECUACIONES	vii
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS E INSTRUMENTACIÓN	4
2.1. Propiedades de la emisión de electrones secundarios.....	6
2.2. Sistema de ultra-alto vacío	13
2.2.1. Campana de ultra-alto vacío.....	14
2.2.2. Sistema de bombeo	15
2.3. Características del cañón de electrones y la fuente de alimentación	17
2.3.1. Cañón de electrones ELG-2B-5352.....	17
2.3.2. Fuente de alimentación EGPS-2B-670.....	18
2.3.3. Cátodo.....	23
2.3.4. Wehnelt o rejilla (G-1).....	23
2.3.5. Ánodo (G-2)	24
2.3.6. Focus	25
2.3.7. Deflexión	25
2.3.8. Parámetros típicos de operación	26
2.3.9. Dimensiones	26
2.3.10. Modos de funcionamiento del cañón de electrones. Relaciones Energía- Focus para obtener el mínimo <i>spot</i> del haz en la muestra.....	27
2.4. Características del picoamperímetro Keithley. Comunicación a través de una interfaz GPIB	29
2.4.1. Panel frontal del picoamperímetro Keithley 6487	30
2.4.2. Panel trasero del picoamperímetro Keithley 6487.....	32
2.4.3. Interlock.....	33
2.4.4. GPIB-USB-HS	34
2.5. Control de la fuente (PC + Tarjeta PCI-6024E).....	36
2.5.1. PC.....	36
2.5.2. Tarjeta PCI-6024E	36
3. AUTOMATIZACIÓN DEL CONTROL DEL CAÑÓN DE ELECTRONES Y ADQUISICIÓN DE LA CORRIENTE EN MUESTRA.....	41



4. SOFTWARE PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA LABVIEW®	48
4.1. Introducción.....	49
4.2. Descripción del panel frontal	51
4.2.1. Menú principal	52
4.2.2. Barrido de Energía con <i>spot</i> mínimo	52
4.2.2.1. Panel frontal	52
4.2.2.1.1. Botones de control de la aplicación	53
4.2.2.1.2. Controles de medida	54
4.2.2.1.3. Indicadores de medida	56
4.2.3. Barrido de Energía con Focus constante	58
4.2.3.1. Panel frontal	58
4.2.3.2. Controles de medida	59
4.2.4. Barrido de la tensión del Focus con Energía constante	59
4.2.4.1. Panel frontal	60
4.2.4.2. Controles de medida	60
4.3. Descripción del diagrama de bloques.....	61
4.3.1. Jerarquía de la aplicación	61
4.3.2. Menuprincipal.vi	62
4.3.3. Barrido de Energía con <i>spot</i> mínimo.vi.....	63
4.3.3.1. Condiciones previas al barrido.....	63
4.3.3.2. Secuencia de barrido.....	64
4.3.3.3. Subprograma formularyp.vi	71
4.3.4. Barrido de Energía con Focus constante.vi	72
4.3.5. Barrido de la tensión del Focus con Energía constante.vi.....	74
4.3.6. Comentario sobre los subprogramas instrumentx.vi y daqx.vi.....	75
5. RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	76
5.1. Barrido lineal en Energía.....	78
5.2. Barrido lineal del voltaje de Focus	80
5.3. Comparación de las curvas (I-E) en modo automático y manual	81
5.4. Condiciones de barrido para obtener un <i>spot</i> mínimo	82
5.4.1. Ajuste de voltaje de Focus a una parábola	83
5.4.2. Ajuste de voltaje de Focus a una recta.....	83
5.5. Variación de la intensidad de la corriente en función del potencial del ánodo (G2).....	85
5.6. Variación de la intensidad en función de la polarización de la muestra.....	86
5.7. Cálculo del coeficiente de emisión secundaria	87



6. RESUMEN Y CONCLUSIONES	95
7. BIBLIOGRAFÍA	99
8. ANEXO	101
8.1. Jerarquía de la aplicación.	102
8.2. Menuprincipal.vi.....	103
8.3. Barrido_Focus_y_Energy3.vi	104
8.4. Subprograma formulaRyP.vi	107
8.5. Barrido_de_Energy_con_Focus_cte3.vi	108
8.6. Barrido_Focus_con_Energy_cte3.vi	111
8.7. Modificación del programa. Versión 1.1.	114

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1. Representación de las corrientes que definen los diferentes componentes de la emisión secundaria de electrones¹</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2.2. Ejemplo de un espectro de la emisión de electrones para un acero inoxidable bombardeado por un haz de electrones incidentes de 300 eV¹</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2.3. Coeficientes de emisión de electrones secundarios en función de la energía del haz incidente para el acero inoxidable¹</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2.4. Ejemplo genérico del coeficiente de emisión de electrones secundarios (δ) en función de la energía primaria (E_p)²</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2.5. Representación del valor reducido del coeficiente de emisión secundaria δ/δ_m en función de E_p/E_m</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2.6. Esquema del sistema utilizado para medir la corriente en muestra.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2.7. Sistema general de ultra-alto vacío y sistema de control.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2.8. Campana de ultra-alto vacío.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2.9. Vista en planta de la configuración inicial de la campana de ultra-alto vacío</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2.10. Rango de presiones de trabajo para bombas de vacío.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2.11. Sistema de bombeo.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 2.12. Cañón de electrones ELG-2 y fuente de alimentación EGPS-2.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2.13. Panel frontal de la fuente de alimentación EGPS-2.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2.14. Panel trasero de la fuente de alimentación EGPS-2</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2.15. Esquema de conexión del cañón de electrones</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2.16. Interruptores Local/Remote vistos en modo local, con sus respectivos terminales exteriores</i>	<i>22</i>



Figura 2.17. Diagrama de bloques del cañón de electrones ELG-2	22
Figura 2.18. a) Emisión de electrones frente a la temperatura del cátodo manteniendo la tensión en G-2 constante.....	23
Figura 2.18. b) Emisión de electrones frente a la tensión del ánodo (G-2) manteniendo la temperatura del cátodo constante	23
Figura 2.19. a) Emisión de corriente frente al voltaje de la rejilla para High Energy y Low Energy.....	24
Figura 2.19. b) Emisión de corriente frente al voltaje de la rejilla para diferentes potenciales en el ánodo (G-2)	24
Figura 2.20. Emisión y corriente frente al voltaje del ánodo (G-2).....	24
Figura 2.21. a) Tamaño del spot frente al Focus para una Energía constante.....	25
Figura 2.21. b) Valores de Focus que proporcionan un tamaño de spot mínimo	25
Figura 2.22. Placas de deflexión del cañón de electrones ELG-2.....	25
Figura 2.23. Dimensiones del cañón de electrones ELG-2 (mm).....	26
Figura 2.24. Representación del voltaje del Focus (V) frente a la Energía (eV).....	27
Figura 2.25. Representación del tamaño del spot (mm) frente al Focus (V).....	28
Figura 2.26. Panel frontal del modelo 6487	30
Figura 2.27. Panel trasero del modelo 6487	32
Figura 2.28. Conexiones del interlock en el picoamperímetro 6487	34
Figura 2.29. Tarjeta GPIB-USB-HS.....	35
Figura 2.30. Tarjeta PCI-6024E.....	37
Figura 2.31. Placa de conexión CB-68LP con clema de 68 pines	39
Figura 2.32. Cable R6868 Ribbon I/O.....	40
Figura 2.33. Asignación de pines en la tarjeta PCI 6024E. Conector CB-68LP	40
Figura 3.1. Esquema general de la conexión entre el equipo y los instrumentos empleados en el proyecto.....	42
Figura 3.2. Esquema de la placa CB-68LP con las conexiones.....	44
Figura 3.3. Terminales de tornillo de la fuente de energía Kimball con las conexiones.....	45
Figura 3.4. Esquema de conexión entre la fuente de alimentación y el cañón de electrones.....	45
Figura 3.5. Terminal de la campana donde se conecta el cable apantallado que mide la corriente	46
Figura 3.6. Esquema eléctrico de las conexiones del cañón y la muestra.....	47
Figura 3.7. Panel trasero del picoamperímetro Keithley 6487 con la tarjeta GPIB- USB-HS conectada.....	47
Figura 4.1. Ejemplo de panel frontal en LabVIEW®	50
Figura 4.2. Ejemplo de Diagrama de Bloques en LabVIEW®	51



Figura 4.3. Menú de selección.....	52
Figura 4.4. Panel frontal del programa Barrido de Energía con Spot mínimo	53
Figura 4.5. Control START.....	53
Figura 4.6. Control STOP.....	53
Figura 4.7. Control PAUSE.....	54
Figura 4.8. Control de Voltaje de la Fuente	54
Figura 4.9. Control de Energía inicial.....	54
Figura 4.10. Control de Energía final.....	54
Figura 4.11. Control del Incremento de Energía por intervalo.....	55
Figura 4.12. Control del Intervalo de tiempo	55
Figura 4.13. Selección del tipo de ajuste	55
Figura 4.14. Control de las variables “a” y “b”	56
Figura 4.15. Indicador de tiempo total.....	56
Figura 4.16. Indicador de tiempo transcurrido	56
Figura 4.17. Indicador de Voltaje.....	56
Figura 4.18. Indicador de Energía	57
Figura 4.19. Indicador de Focus	57
Figura 4.20. Indicador de Corriente	57
Figura 4.21. Representación gráfica de E/t y C/E.....	58
Figura 4.22. Panel frontal del programa Barrido de Energía con Focus constante	59
Figura 4.23. Control del Focus.....	59
Figura 4.24. Panel frontal del programa Barrido del voltaje del Focus con Energía constante.....	60
Figura 4.25. Control de Focus inicial.....	60
Figura 4.26. Control de Focus final.....	61
Figura 4.27. Control de Energía.....	61
Figura 4.28. Jerarquía de la aplicación.....	62
Figura 4.29. Selección de subprograma en el Menú Principal.....	62
Figura 4.30. Inicialización de los controles START, STOP y PAUSE.....	63
Figura 4.31. Control de los indicadores del panel frontal.....	64
Figura 4.32. Detención de la aplicación en caso de cerrar el panel frontal.....	64
Figura 4.33. Etapa 1. Inicialización de instrumentos	65
Figura 4.34. Etapa 2. Primer tiempo de espera.....	65
Figura 4.35. Etapa 3. Barrido de Energía y ajuste del Spot.....	67
Figura 4.36. Paso A.....	68
Figura 4.37. Paso B.....	68
Figura 4.38. Paso C.....	69
Figura 4.39. Paso D1.....	69
Figura 4.40. Paso D2.....	70



<i>Figura 4.41. Etapa 4. Segundo tiempo de espera</i>	70
<i>Figura 4.42. Etapa 5. Reseteo de instrumentos</i>	70
<i>Figura 4.43. Etapa 6. Detención del programa</i>	70
<i>Figura 4.44. Ecuación de la Recta $F=(a+bE)$</i>	71
<i>Figura 4.45. Ecuación de la Parábola</i>	71
<i>Figura 4.46. Etapa 1. Inicialización de instrumentos</i>	72
<i>Figura 4.47. Etapa 3. Barrido de Energía</i>	73
<i>Figura 4.48. Etapa 1. Inicialización de instrumentos</i>	74
<i>Figura 4.49. Paso A</i>	74
<i>Figura 5.1. Variación de la Energía del haz de electrones en función del tiempo</i>	79
<i>Figura 5.2. Representación de la Intensidad en función de la Energía</i>	79
<i>Figura 5.3. Representación del voltaje de Focus en función del Tiempo</i>	80
<i>Figura 5.4. Representación de la Intensidad en función del Focus</i>	81
<i>Figura 5.5. Intensidad de la corriente en muestra en función de la Energía del haz para medidas en modo manual y automático</i>	82
<i>Figura 5.6. Intensidad de corriente en función de la Energía ajustando el voltaje del Focus a una parábola</i>	83
<i>Figura 5.7. Intensidad de la corriente en función de la Energía ajustando el voltaje del Focus a una recta</i>	84
<i>Figura 5.8. Intensidad en función de la Energía para diferentes valores de G_2</i>	85
<i>Figura 5.9. Intensidad en función de la Energía para diferentes valores de potencial de la muestra</i>	86
<i>Figura 5.10. Representación del coeficiente de emisión secundaria en función de la Energía ajustando el voltaje del Focus a una parábola</i>	87
<i>Figura 5.11. Representación del coeficiente de emisión secundaria en función de la Energía ajustando el voltaje del Focus a una recta</i>	88
<i>Figura 5.12. Representación del coeficiente de emisión secundaria en función de la Energía ajustando el voltaje del Focus a la recta $0.75E$</i>	89
<i>Figura 5.13. Comparación del coeficiente de emisión secundaria para los distintos experimentos realizados</i>	90
<i>Figura 5.14. Representación del coeficiente de emisión secundaria en función de la Energía del haz incidente con su máximo y las energías de cruce</i>	91
<i>Figura 5.15. Parámetro δ/δ_m en función de E_p/E_m y comparación con una Gaussiana</i>	93



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Aplicaciones de la emisión secundaria.....	5
Tabla 2.2. Tabla de especificaciones técnicas del cañón de electrones ELG-2	19
Tabla 2.3. Especificaciones técnicas de la fuente de alimentación EGPS-2	19
Tabla 2.4. Parámetros de operación para el cañón d electrones ELG-2.....	26
Tabla 2.5. Capacidades de medida de corriente del modelo 6487.....	29
Tabla 2.6. Capacidades de la fuente de voltaje del modelo 6487.....	29
Tabla 2.7. Especificaciones de la tarjeta GPIB-USB-HS.....	35
Tabla 2.8. Especificaciones de la tarjeta PCI-6024E.....	37

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2.1. $E_I = 0.51E_m \delta_m^{-1.32}$	8
Ecuación 2.2. $\frac{\delta}{\delta_m} = \exp \left\{ - \frac{\left[\ln \frac{E_p}{E_m} \right]^2}{2\sigma^2} \right\}$	9
Ecuación 2.3. $E_I = E_m \cdot e^{-\sqrt{5 \ln \delta_m}}$	10
Ecuación 2.4. $\delta = \frac{\text{Número de electrones emitidos}}{\text{Número de electrones u otras partículas incidentes}}$	11
Ecuación 2.5. $I_M(0V) = I_p - I_s$	11
Ecuación 2.6. $I_M(40V) = I_p$	11
Ecuación 2.7. $I_s = I_M(40V) - I_M(0V) = I_p - I_M(0V)$	11
Ecuación 2.8. $\delta = \frac{I_M(40V) - I_M(0V)}{I_M(40V)} = \frac{I_s}{I_p}$	11



1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.

El presente proyecto ha sido realizado en el Laboratorio de Superficies del Departamento de Física de la Universidad Carlos III de Madrid.

El proyecto ha consistido en automatizar el control de la Energía y el potencial de Focalización de un cañón de electrones y la medida de la corriente en muestra para determinar la emisión de electrones secundarios producidos por el haz de electrones incidente en una superficie en un entorno de ultra-alto vacío.

Para su desarrollo se ha contado con un cañón de electrones Kimball ELG-2, una fuente de energía EGPS-2B, un picoamperímetro Keithley 6487, una tarjeta de adquisición PCI-6024E y una tarjeta GPIB-USB-HS de National Instruments.

La aplicación que facilita el control de todos los instrumentos necesarios para la medida y la adquisición de datos se ha desarrollado en LabVIEW[®], un lenguaje de programación gráfica que está revolucionando la industria y que también se está empezando a usar en la investigación académica tradicional y en la enseñanza. Este lenguaje permite crear una interfaz usuario-máquina intuitiva y de fácil manejo, uno de los objetivos que se pretendían al realizar la aplicación.

Los objetivos del proyecto han sido:

- Estudiar los fundamentos de la técnica de emisión secundaria.
- Aprender el funcionamiento y manejo de la instrumentación y los dispositivos vinculados con la aplicación a desarrollar (cañón de electrones, picoamperímetro, fuente de energía, sistema de ultra-alto vacío).
- Adquirir los conceptos de la programación gráfica en LabVIEW[®] (software de National Instruments).
- Desarrollar una aplicación que permita el control del cañón de electrones, la adquisición de los datos generados y el posterior almacenamiento de estos para su tratamiento.
- Realizar el montaje físico del equipamiento a controlar por la aplicación.
- Comprobar el correcto funcionamiento de la aplicación a través de la realización de experimentos y el estudio de los resultados obtenidos.

La presente memoria se ha dividido en cinco capítulos que se detallan a continuación:

En este primer capítulo se describen los objetivos del proyecto y se realiza una descripción del contenido de cada capítulo.



En el capítulo 2 se explican las bases de la teoría de la técnica de emisión secundaria, se describe el sistema de ultra-alto vacío además de las características y modos de funcionamiento de la instrumentación relacionada con la aplicación:

- Cañón de electrones Kimball ELG-2 Electron Gun y Fuente de alimentación Kimball EGPS-2 Power Supply.
- Picoamperímetro Keithley 6487 (Técnicas de medida para pequeñas corrientes y con fuente de polarización flotante).
- Comunicación a través de una interfaz GPIB.
- Tarjeta PCI-6024E + PC.

En el capítulo 3 se describe el procedimiento de medida de la corriente en muestra, así como también la forma en que debe conectarse la instrumentación para conseguir controlar:

- La Energía y la tensión de Focalización del haz de electrones incidente en la muestra.
- La polarización y la adquisición de la corriente de electrones en la muestra.

En el capítulo 4 se aborda el desarrollo de la aplicación de software creada en LabVIEW[®] y se describe el código de la aplicación. Para seguir adecuadamente las explicaciones de este capítulo es conveniente disponer de una base teórica para la programación en LabVIEW[®].

En el capítulo 5 se presentan los experimentos realizados para comprobar el correcto funcionamiento del programa, así como los resultados obtenidos en la medida de emisión secundaria de un acero al carbono.

En el capítulo 6 se resumen las conclusiones del proyecto y se proponen algunas mejoras al sistema de control y adquisición, basadas en el estudio realizado y los resultados obtenidos.

También se incluye un manual de usuario del programa en el que se explican las diferentes funciones que tienen los elementos de la pantalla sobre la que trabaja el usuario.



<p>2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS E INSTRUMENTACIÓN</p>

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS E INSTRUMENTACIÓN.

Básicamente, la emisión de electrones secundarios tiene su origen en el bombardeo de un material por un haz de electrones, iones, fotones, y en general de cualquier partícula.

En algunos casos la emisión secundaria es un fenómeno indeseable, mientras que es útil en otros. Por ejemplo, la aparición de emisión secundaria en el ánodo de un tubo de vacío termoiónico es perturbadora, y se deben tomar medidas para evitarla. Por otro lado, la emisión secundaria se utiliza en los multiplicadores electrónicos, dispositivos diseñados especialmente para producir una copiosa emisión de electrones secundarios. Algunos fenómenos deben su existencia a la emisión secundaria, como por ejemplo la descarga luminosa en un gas que forma la base de la iluminación fluorescente y se sostiene gracias a la emisión de un número de electrones secundarios relativamente pequeño en el cátodo, debida al impacto de iones positivos.

En la Tabla 2.1 se describen algunas aplicaciones de la emisión secundaria producida por electrones, fotones e iones:

Partícula incidente	Aplicación	Descripción de la aplicación
Electrones	Electromultiplicador	Multiplicador de electrones que permite aumentar el número de electrones incidentes y detectar la señal.
Fotones	Fotomultiplicador	Detector óptico de vacío que aprovecha el efecto de la emisión secundaria de electrones para responder a niveles muy bajos de iluminación, manteniendo un nivel de ruido aceptable.
	Fotoemisor	Emiten electrones cuando existe energía radiante que incide sobre material sensible a dicha radiación.
Iones	Pantallas de plasma	Pantalla plana habitualmente utilizada para grandes TV.
	Lámparas fluorescentes	Tubos fluorescentes, normalmente empleados para iluminación doméstica e industrial, con gran eficiencia energética.

Tabla 2.1. Aplicaciones de la emisión secundaria

A continuación se describen las propiedades de la emisión de electrones secundarios producidos por un haz de electrones incidente en una superficie, ya que en el presente proyecto la fuente primaria utilizada es un cañón de electrones.

2.1 Propiedades de la emisión de electrones secundarios.

Las tres componentes principales de la emisión secundaria.

Cuando una corriente constante de electrones I_0 impacta sobre una superficie, cierta parte de la corriente se refleja elásticamente (I_e) mientras que el resto penetra en el material. Algunos de esos electrones que penetran en el material se dispersan dentro de una o más capas en su interior y son desviados de regreso a la superficie. Estos son los llamados electrones retrodispersados, y a su corriente la denominamos I_r . El resto de los electrones interactúan con el material provocando la emisión de electrones o los denominados “verdaderos electrones secundarios”, a cuya corriente la llamamos I_{ts} .

En la Figura 2.1 podemos ver un esquema de los diferentes tipos de corrientes producidos en el material al incidir un haz de corriente I_0 ¹:

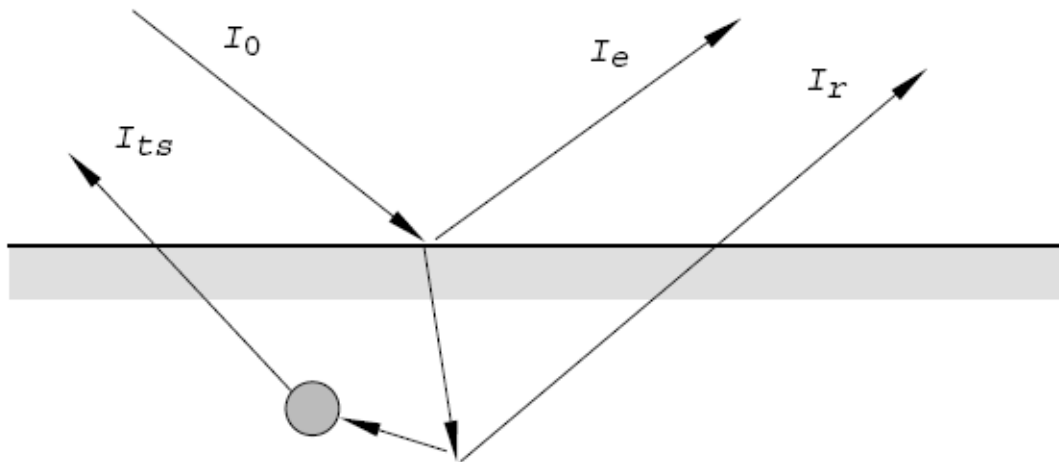


Figura 2.1. Representación de las corrientes que definen los diferentes componentes de la emisión secundaria de electrones¹

El coeficiente de emisión para cada tipo de electrones puede definirse como:

δ_e , coeficiente de emisión de electrones elásticos:

$$\delta_e = I_e / I_0$$

δ_r , coeficiente de emisión de electrones retrodispersados:

$$\delta_r = I_r / I_0$$

δ_{ts} , coeficiente de emisión de electrones secundarios:

$$\delta_{ts} = I_{ts} / I_0$$

con lo que la emisión secundaria total, obtenida como suma de las anteriores δ , es:

$$\delta = (I_e + I_r + I_{ts}) / I_0 = \delta_e + \delta_r + \delta_{ts}$$

En la Figura 2.2 se muestra la contribución de los tres tipos de emisión de electrones, así como la emisión secundaria total en función de su energía cinética, para el caso de un haz de electrones que incide con una energía $E_0 = 300$ eV sobre la superficie de un acero inoxidable¹, como será el tipo de muestra que analicemos.

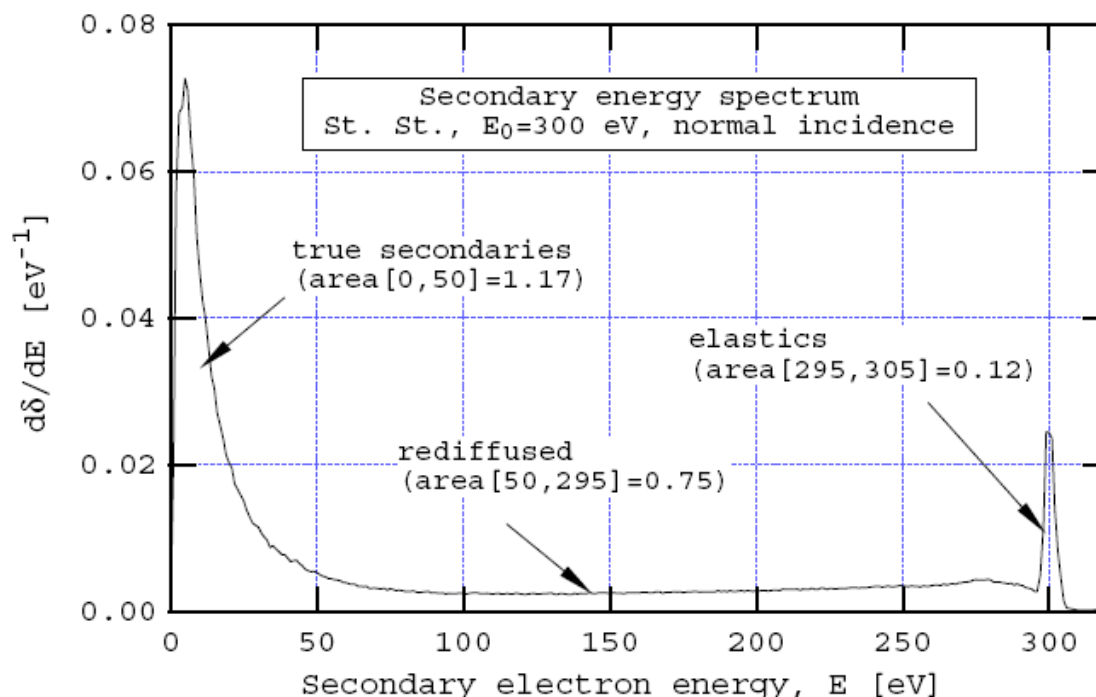


Figura 2.2. Ejemplo de un espectro de la emisión de electrones para un acero inoxidable bombardeado por un haz de electrones incidentes de 300 eV¹

Se observa que los verdaderos electrones secundarios tienen una energía cinética baja, menor de 50 eV, siendo mayor la emisión a menor energía cinética. Los electrones retrodispersados se emiten en poca cantidad entre 50 y 295 eV, mientras que los electrones elásticos se emiten alrededor de la energía del haz incidente, en este caso 300 eV.

En la Figura 2.3 se representan los diferentes coeficientes de emisión secundaria en función de la energía del haz de electrones incidente para una muestra de acero inoxidable:

- Los electrones elásticos, δ_e , en curva de color rojo.
- Los electrones retrodispersados, δ_r , en curva color verde.
- Los electrones secundarios-verdaderos, δ_{ts} , en curva de color azul.
- La emisión total, suma de las anteriores ($\delta_e + \delta_r + \delta_{ts}$), en curva de color negro.
- El ajuste de la curva de emisión total dada por Kirby¹ con el símbolo +, que ajusta muy bien los datos.

Como en el proyecto solamente se considerarán los verdaderos electrones secundarios, a partir de aquí $\delta_{ts} = \delta$.

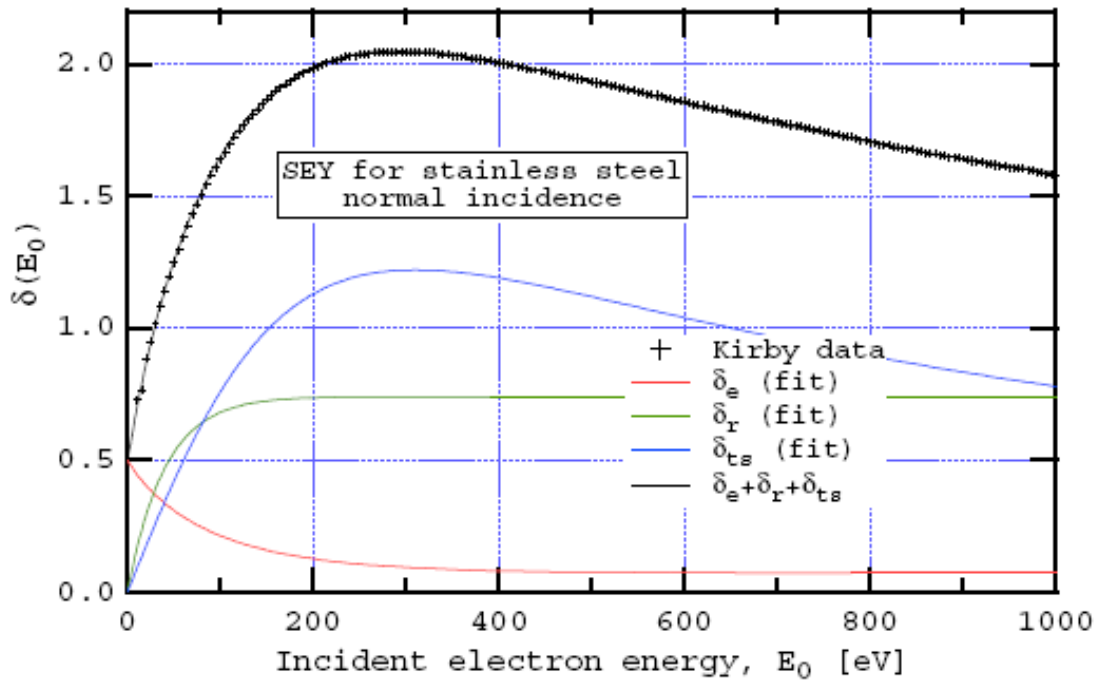


Figura 2.3. Coeficientes de emisión de electrones secundarios en función de la energía del haz incidente para el acero inoxidable¹

Curva genérica y curva universal del coeficiente de emisión de electrones secundarios.

En la Figura 2.4 se muestra una curva genérica que representa el coeficiente de emisión de electrones secundarios δ en función de la energía del haz de electrones incidente E_p . Se puede observar que para valores de baja energía δ se incrementa en función de E_p . Esto es resultado del hecho de que con el incremento de la energía del haz más electrones secundarios pueden ser excitados. Sin embargo, los electrones secundarios tienen una pequeña profundidad de escape debido a su baja energía (0 a 50 eV). Esta profundidad de escape es del orden de 10 nm. A una cierta energía del haz la profundidad de penetración de los electrones primarios llega a ser mayor que la profundidad de escape de los secundarios, resultando en una disminución de δ . En la Figura 2.4 se observa que se alcanza $\delta=1$ para dos valores de energía primaria. Esos valores de energía se han llamado como la primera - de baja energía - y la segunda - de alta energía - energías de cruce E_I y E_{II} .

Dionne desarrolló una teoría semi-empírica que nos permite calcular aproximadamente el valor de E_I (válida para $\delta_m > 1.5$) aplicando la siguiente ecuación²:

$$E_I = 0.51 E_m \delta_m^{-1.32} \quad (2.1)$$

donde δ_m es el máximo coeficiente de emisión secundaria y E_m es la energía primaria a la que se alcanza este máximo.

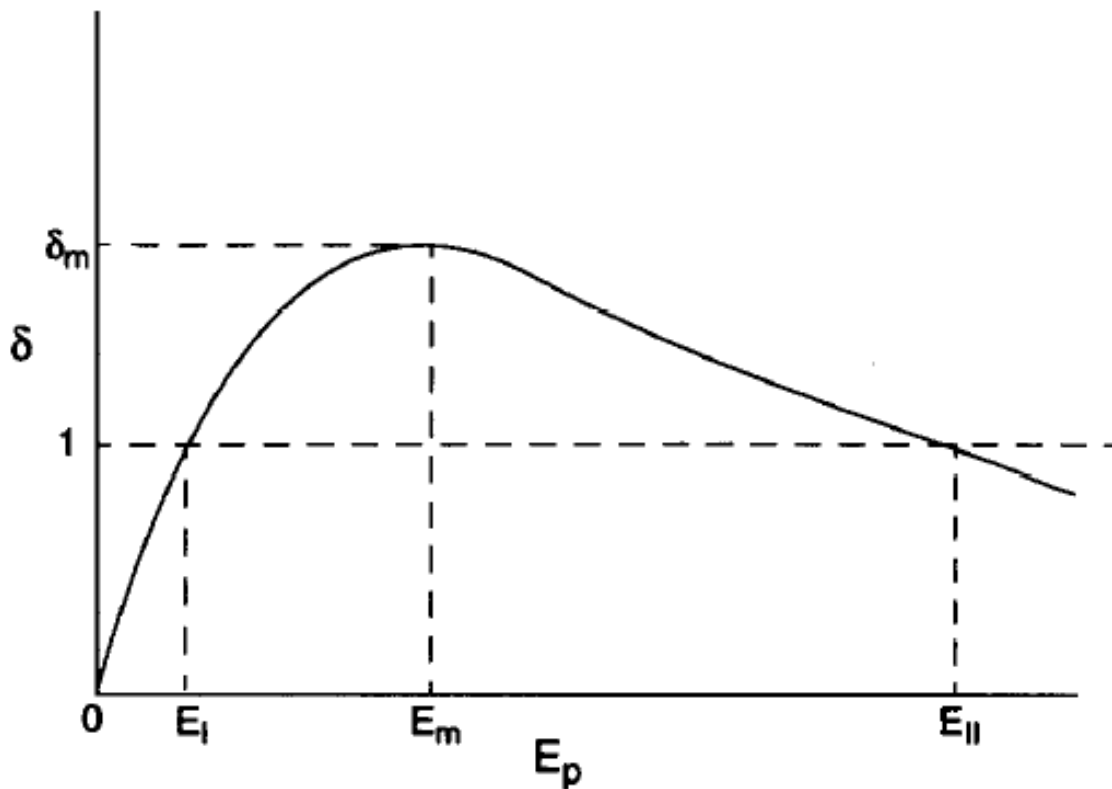


Figura 2.4. Ejemplo genérico del coeficiente de emisión de electrones secundarios (δ) en función de la energía primaria (E_p)²

En la Figura 2.5 podemos ver, para Au, acero inoxidable, cristal de sosa, MgO y Si, el valor reducido del coeficiente de emisión secundaria, definido como δ/δ_m en función de E_p/E_m . La escala de la energía es logarítmica para enfatizar la parte de baja energía. En esta Figura observamos que los datos para todos los materiales siguen más o menos una curva universal². La curva de la Figura 1.5 es una Gaussiana en el logaritmo de E_p/E_m de acuerdo a la expresión:

$$\frac{\delta}{\delta_m} = \exp \left\{ - \frac{\left[\ln \frac{E_p}{E_m} \right]^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (2.2)$$

con $\sigma = 1.6$.

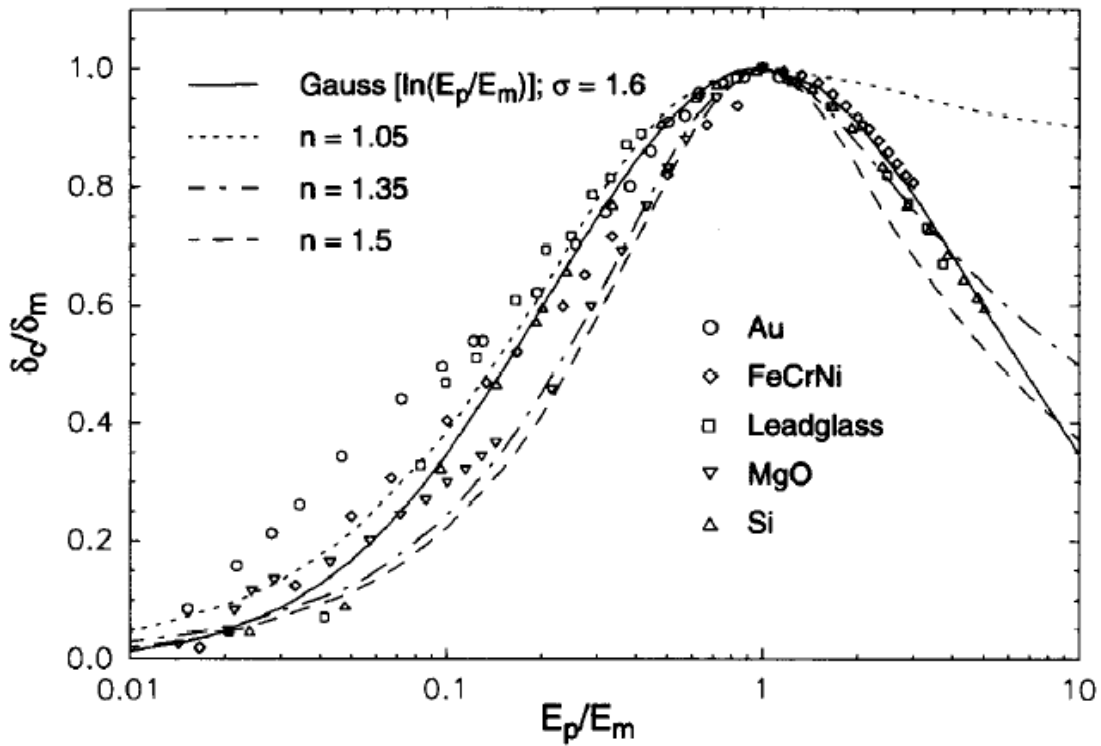


Figura 2.5. Representación del valor reducido del coeficiente de emisión secundaria δ_c/δ_m en función de E_p/E_m^2

Estimación de la primera energía de cruce E_I .

El valor de E_I puede ser estimado a partir de los valores de δ_m y E_m . En primer lugar, tenemos la ecuación (2.1) para E_I obtenida por Dionne, y en segundo, la ecuación (2.2) que ajusta δ/δ_m a una Gaussiana². En este último caso, tenemos para E_I :

$$E_I = E_m \cdot e^{-\sqrt{5 \ln \delta_m}} \quad (2.3)$$

Determinación experimental del coeficiente de emisión de electrones secundarios.

Para cuantificar los datos experimentales es usual utilizar el coeficiente de emisión secundaria δ , que se define como:

$$\delta = \frac{\text{Número de electrones emitidos}}{\text{Número de electrones u otras partículas incidentes}} \quad (2.4)$$

El coeficiente δ varía en un rango muy amplio, desde 10^{-2} hasta 10^2 , según el material.

El procedimiento experimental que hemos seguido para determinar el coeficiente de emisión de electrones secundarios es el siguiente:

- Con el picoamperímetro medimos la corriente de la muestra sin polarizar (conectada a tierra), $I_M(0V)$, que es la resultante de la corriente primaria I_p (electrones que llegan a la muestra) menos la corriente secundaria I_s (electrones que salen de la muestra):

$$I_M(0V) = I_p - I_s \quad (2.5)$$

- A continuación se mide la corriente en muestra polarizada positivamente, con un potencial mayor de +40V, $I_M(40V)$, de modo que los electrones del material no tengan energía suficiente para escapar y, por tanto, la corriente de la muestra es igual a la corriente incidente:

$$I_M(40V) = I_p \quad (2.6)$$

- Con estos dos valores obtenemos el valor de la corriente de electrones secundarios emitidos por la muestra I_s :

$$I_s = I_M(40V) - I_M(0V) = I_p - I_M(0V) \quad (2.7)$$

- Finalmente, el coeficiente de emisión de electrones secundarios δ se determinará como:

$$\delta = \frac{I_M(40V) - I_M(0V)}{I_M(40V)} = \frac{I_s}{I_p} \quad (2.8)$$

En la Figura 2.6 podemos observar un esquema del sistema utilizado para medir la corriente en muestra.

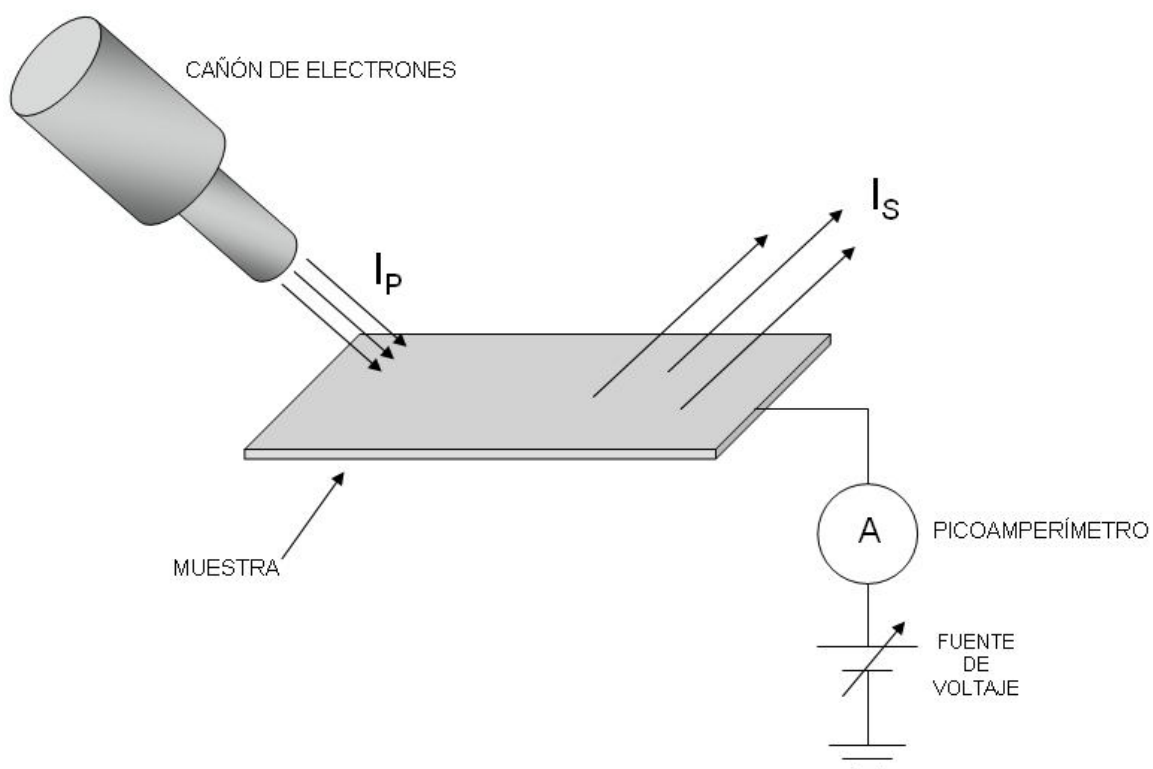


Figura 2.6. Esquema del sistema utilizado para medir la corriente en muestra

El equipo y la instrumentación necesarios para llevar a cabo las medidas de las corrientes anteriormente mencionadas son los que se indican a continuación y se detallan en los siguientes apartados:

- Sistema de ultra-alto vacío (Sección 2.2)
- Cañón de electrones Kimball ELG-2 Electro Gun (Sección 2.3.1)
- Fuente de alimentación Kimball EGPS-2 Power Supply (Sección 2.3.2)
- Picoamperímetro Keithley 6487 (Sección 2.4)
- Tarjeta GPIB-USB-HS (Sección 2.4.4)
- PC (Sección 2.5.1)
- Tarjeta DAQ PCI-6024E (Sección 2.5.2)
- Placa de conexión CB-68LP (Sección 2.5.2)

2.2. Sistema de ultra-alto vacío.

El equipo consiste en un sistema de ultra-alto vacío en el cual se realizan estudios de superficie.

Los diferentes elementos que lo componen pueden verse en la Figura 2.7 y sus diversos principios de funcionamiento son descritos a continuación:



Figura 2.7. Sistema general de ultra-alto vacío y sistema de control

1. Campana de ultra-alto vacío bombeado por 5 bombas iónicas
2. Sistema de bombeo previo
3. Picoamperímetro Keithley 6487
4. Fuente de energía Kimball EGPS-2B
5. Manipulador de la muestra
6. Placa de conexión
7. Cañón de electrones
8. PC de control
9. Sistema de introducción de muestras

2.2.1. Campana de ultra-alto vacío.

La campana de ultra-alto vacío (Figura 2.8) permite crear las condiciones adecuadas (vacío) para el estudio de superficies de materiales a muy bajas presiones, y, por tanto, muy pequeña contaminación de gases. En ella se incorpora la instrumentación necesaria para las técnicas de análisis utilizadas, así como los dispositivos de ultra-alto vacío para la obtención de muy bajas presiones ($\sim 10^{-10}$ mbar).

El cuerpo de la campana es de acero inoxidable, material fácil de mecanizar y limpiar, y se puede calentar en un amplio rango de temperaturas, desde temperatura ambiente a 250°C, lo cual es necesario en el proceso de desgasificación. Además presenta una tasa de desgasificación relativamente pequeña. Por el contrario presenta el inconveniente de tener mucho peso, dificultando su transporte.

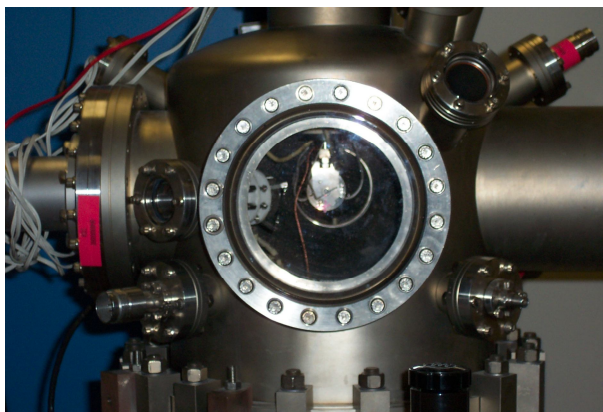


Figura 2.8. Campana de ultra-alto vacío

La campana de ultra-alto vacío tiene un total de 16 entradas de diferentes diámetros repartidas en su superficie cilíndrica. Dispone de 5 entradas principales acopladas a bridas DN-200-CF, DN-150-CF y DN-100-CF y 11 entradas secundarias con bridas DN-35-CF. En ellas está insertada la diversa instrumentación requerida para los estudios de superficie realizados con el sistema de ultra-alto vacío.

En la Figura 2.9 se observa la vista en planta de la configuración de la campana de ultra-alto vacío y la localización del cañón de electrones.

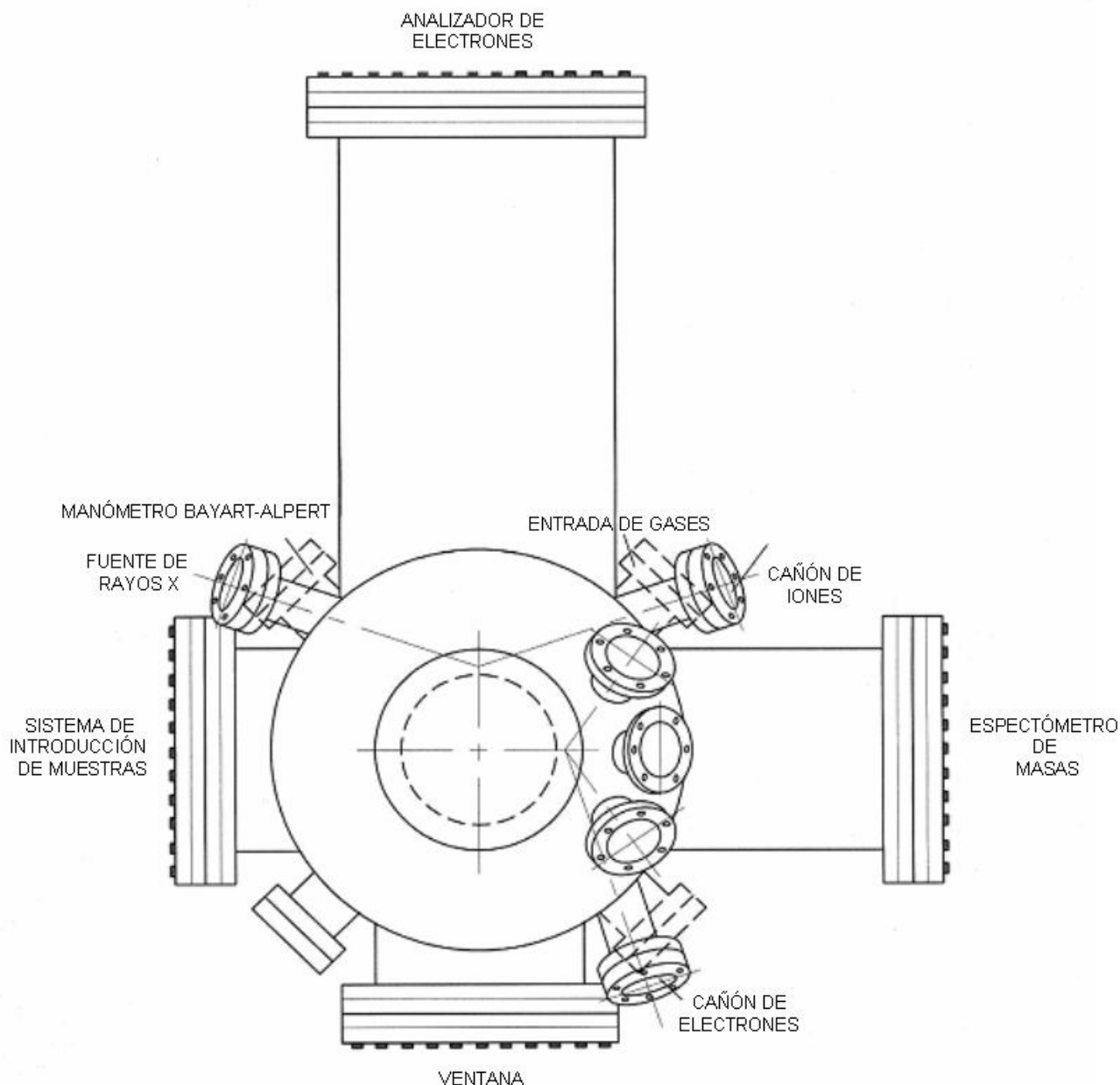


Figura 2.9. Vista en planta de la configuración inicial de la campana de ultra-alto vacío

2.2.2. Sistema de bombeo.

La evacuación de los gases en el interior de la campana de ultra-alto vacío se realiza en varias etapas, usándose un tipo de bomba diferente en cada una de las etapas, ya que ninguna de las bombas es capaz de producir vacío desde presión atmosférica hasta el ultra-alto vacío ($\sim 10^{-10}$ mbar).

En la Figura 2.10 se muestran los rangos de presiones en los cuales pueden trabajar los distintos tipos de bombas de vacío.

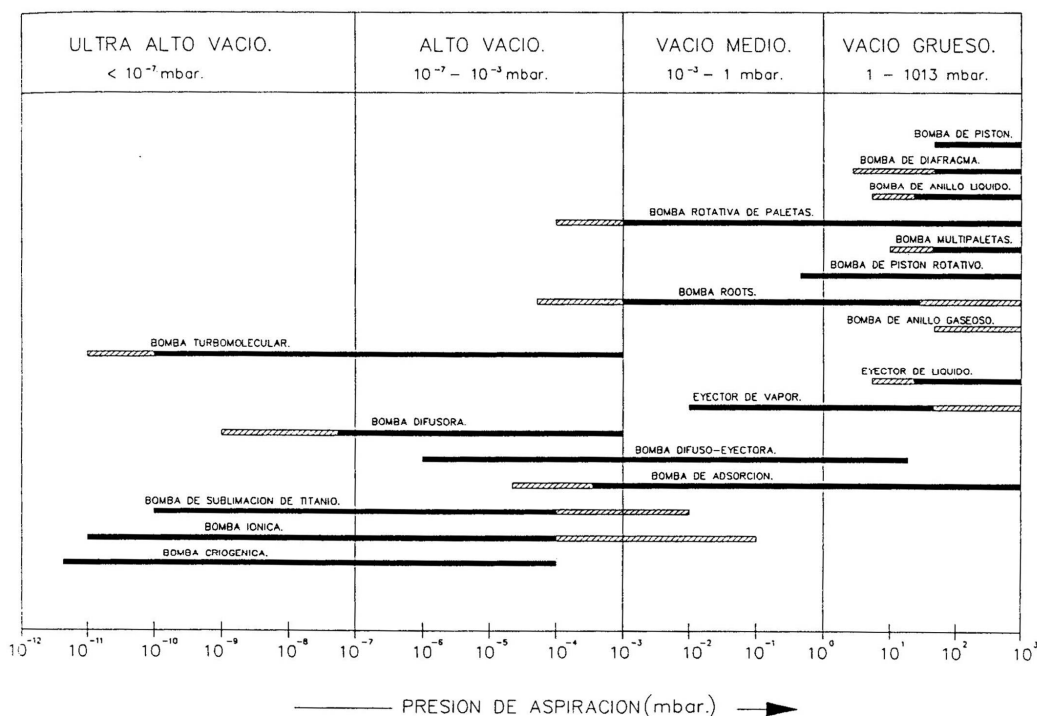


Figura 2.10. Rango de presiones de trabajo para bombas de vacío

Por tanto, una primera etapa consiste en el bombeo desde la presión atmosférica (1013 mbar) hasta una presión en la cual puedan funcionar las bombas de alto vacío (10^{-3} mbar). Para ello se utilizan una serie de bombas primarias, de apoyo o bombas previas. A continuación, una segunda fase permite poner en funcionamiento las bombas de alto vacío y ultra-alto vacío, llegando a alcanzar en la campana presiones inferiores a 10^{-7} mbar.

En la Figura 2.11 podemos ver algunas de las bombas que se utilizan para la evacuación de los gases del interior de la campana de ultra-alto vacío.

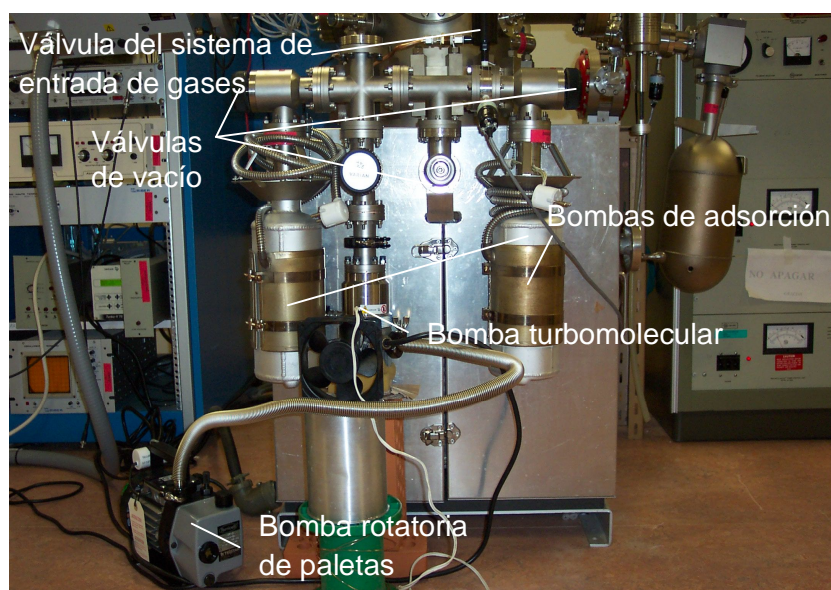


Figura 2.11. Sistema de bombeo



2.3. Características del cañón de electrones y la fuente de alimentación.

El haz de electrones incidente (primario) lo suministra un cañón de electrones de la firma KIMBALL PHYSICS, modelo ELG-2B-5352, que es alimentado por una fuente de alimentación EGPS-2B-670 cuyas características se detallan en los siguientes apartados.

2.3.1. Cañón de electrones ELG-2B-5352.

El cañón de electrones ELG-2B-5352 dispone de un cátodo refractario equipotencial (filamento de tungsteno) para generar un haz de electrones de baja energía. La corriente y la energía del haz se pueden ajustar independientemente en un amplio rango. Por ejemplo, el cañón puede dar una corriente de 1 μA con un tamaño de punto luminoso (*spot*) de 1 mm trabajando a una distancia de 2 cm y con una energía de 10 eV (para más detalles ver tabla de especificaciones técnicas). La intensidad del haz así como el tamaño del *spot* se pueden mantener constantes.

En la Figura 2.12 se puede observar una fotografía del cañón de electrones utilizado. Las características técnicas del cañón se resumen a continuación en la Tabla 2.2.

Aplicaciones típicas	ESD
<i>Energía del haz</i>	5 eV- 1000 eV (ajustable independientemente)
<i>Intensidad corriente del haz</i>	1 nA- 10 μA (ajustable independientemente)
<i>Amplitud energía</i>	Aprox. 0,4 eV amplitud corriente térmica del cátodo
<i>Tamaño del punto luminoso</i>	0.5- 5 mm a una distancia de trabajo de 20 mm (ajustable independientemente)
<i>Distancia de trabajo</i>	20mm óptima variable: 5mm–100mm
<i>Deflexión del haz</i>	4 polos electrostáticos: $\pm 5^\circ$ a 1000 eV Opcional: 8 polos electrostáticos
<i>Capacidad pulsos</i>	Opcional capacitiva: longitud pulsación 20 ns a 100 μs
<i>Unidad bombardeo</i>	Incluye cátodo alineado, montaje Wehnelt (G-1), primer ánodo
<i>Tipos de cátodo</i>	Estándar: Metal refractario Opcional: Óxido de bario, óxido de torio
<i>Montaje</i>	Estándar: brida 2¾ inch rotatable CF Opcional: desmontable
<i>Alineación del haz</i>	Opcional: mecánica con alineador $\pm 2^\circ$

<i>Dimensiones cañón</i>	Longitud inserción estándar: 150 mm excepto orden especificada. Rango: 110 mm a 170 mm. Diámetro: 25.4 mm en la brida del cañón, 19.1 mm en el cuello a 100 mm de la brida
Cables / Conectores	Multiconductor de alta tensión con protección a tierra y conector de aluminio acoplado para conectar cañón y fuente de alimentación. Longitud estándar: 3 m Opcional: 5 m
<i>Opciones</i>	Pulsing/Raster Faraday Cup
<u>Máximo horneado</u>	350 °C sin cables

Tabla 2.2. Tabla de especificaciones técnicas del cañón de electrones ELG-2



Figura 2.12. Cañón de electrones ELG-2 y fuente de alimentación EGPS-2

2.3.2. Fuente de Alimentación EGPS-2B-670.

La fuente de alimentación EGPS-2B-670 proporciona la tensión requerida para el funcionamiento del cañón ELG-2B-535. Esta tensión puede controlarse por medio de unos potenciómetros ubicados en el panel frontal o también en modo remoto a través de conectores presentes en su panel trasero.

En la siguiente tabla (2.3) se indican las especificaciones técnicas de la fuente.

Salidas	Todas las tensiones necesarias para control del cañón de electrones
Estabilidad de la energía	$\pm 0.01 \%$ por hora $\pm 0.02 \%$ por 8 horas con las salidas completas
Estabilidad del haz	$\pm 1.0 \%$ por hora con control de corriente de emisión
Controles	Energía, Focus, G-2, G-1, Source, ECC, Deflexión X e Y
Control remoto/PC	Todas las fuentes de alimentación (excepto deflexión): 0 a +10 V Deflexión: -10 a +10 V
Medidor	Digital: Energía, Focus, X-deflexión, Y-deflexión Analógico: ECC, G-2, G-1, voltios fuente, amperios fuente
Entrada	105 a 125 VAC/ 210 a 240 VAC, 47 a 63 Hz, 100 W
Dimensiones	432 mm x 178 mm x 432 mm

Tabla 2.3. Especificaciones técnicas de la fuente de alimentación EGPS-2

La fuente de alimentación EGPS-2 dispone en su panel frontal (Figura 2.13) de una serie de controles que facilitan la operación del cañón de electrones:

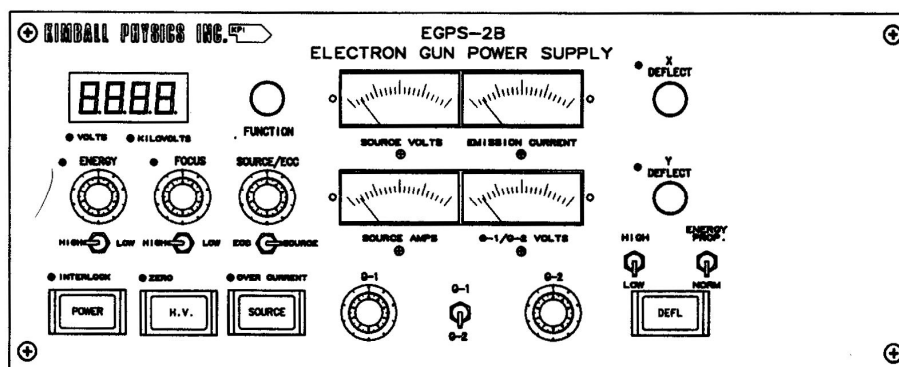


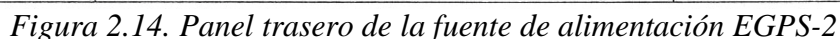
Figura 2.13. Panel frontal de la fuente de alimentación EGPS-2

Estos controles son los que se detallan a continuación:

- **Power Switch:** selecciona entre 115/230 VAC ó +24 VDC.
- **Interlock LED:** si permanece iluminado indica un interruptor abierto debido a un mal ajuste del sistema. En este caso apagar y corregirlo.
- **High Voltaje Switch:** interruptor de Alta Tensión.
- **Zero LED:** se ilumina si el interruptor H.V está presionado cuando los controles de energía están todavía girados. Comprobar que el potenciómetro de energía está a cero.
- **Energy Control:** control para el ajuste de la Energía.



- En el panel trasero de la fuente (Figura 2.14) tenemos los conectores exteriores que nos permiten el control remoto de varias de las funciones presentes en el panel frontal de la fuente. Además están las salidas que conectan con el cañón de electrones, el terminal de tierra y la alimentación de la fuente.



Como se puede ver en la Figura 2.14, en la parte izquierda del panel trasero de la fuente EGPS-2 tenemos tres terminales llamados GRID, SOURCE Y DEFL. que conectan con el cañón de electrones, suministrándole la tensión de trabajo.

En la Figura 2.15 se representa esquemáticamente como se conectan los cables de tensión de la fuente al cañón de electrones.

- **GRID.** Se conecta al cañón mediante un cable coaxial. Ajusta la tensión de la rejilla (G-1) de 0 a -25 V.
- **SOURCE.** Aporta la tensión que calienta el filamento, además de la tensión que controla la Focalización. También se encarga de ajustar la tensión del ánodo (G-2) de 0 a +100 V. Se conecta al cañón con un cable Multiconductor de Alto Voltaje.
- **DEFL.** Controla la tensión de la Deflexión. No se utiliza en nuestro proyecto.

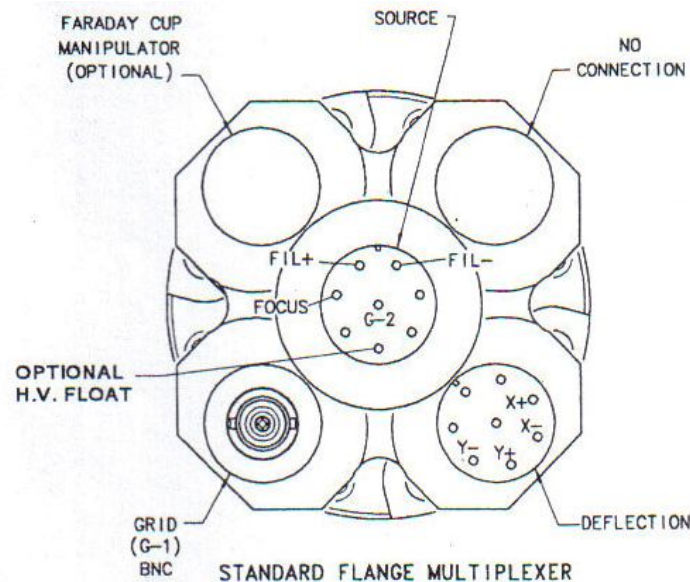


Figura 2.15. Esquema de conexión del cañón de electrones.

A continuación se describe la función de cada uno de los controles situados en el panel trasero de la fuente de alimentación EGPS-2 y ampliado en la Figura 2.16:

- **Remote Control Terminal Block:** se trata de un conjunto de terminales de tornillo que nos permiten el control remoto o por medio de un PC de la Energía del haz, el voltaje de Focus, G-1, G-2, la corriente de emisión (ECC) y la Deflexión en X e Y. Cada terminal representa uno de los controles anteriormente mencionados. El terminal es una entrada analógica que recibe voltaje y programa cada uno de los controles de forma individual para el control remoto.
- **Local / Remote Control Switches:** interruptores de dos posiciones localizados detrás del panel de acceso. Hay uno para cada control del panel frontal. Estos interruptores controlan los potenciómetros del panel frontal y los terminales del *Remote Control Terminal Block* permitiendo seleccionar entre control manual (izquierda=local) o remoto (derecha=remoto). En la Figura 2.16 también se muestra la relación entre los interruptores y los terminales.

- **AC Selector Switch:** interruptor de color rojo con dos posiciones que permite seleccionar el voltaje AC de alimentación entre 115V o 230V.
- **Interlock Terminal Block:** conjunto de dos terminales de tornillo etiquetados como **SPARE INTERLOCK** que desactiva la fuente de energía cuando se produce un circuito abierto.
- **Main Fuse:** fusible principal.
- **External Reference BNC:** es una entrada que permite tomar la tensión de una fuente externa para que todas las tensiones del cañón floten al potencial de referencia de -100V a +100V. Si se cubre el conector BNC con su tapa las tensiones estarán referidas a tierra y el cuerpo del cañón también.

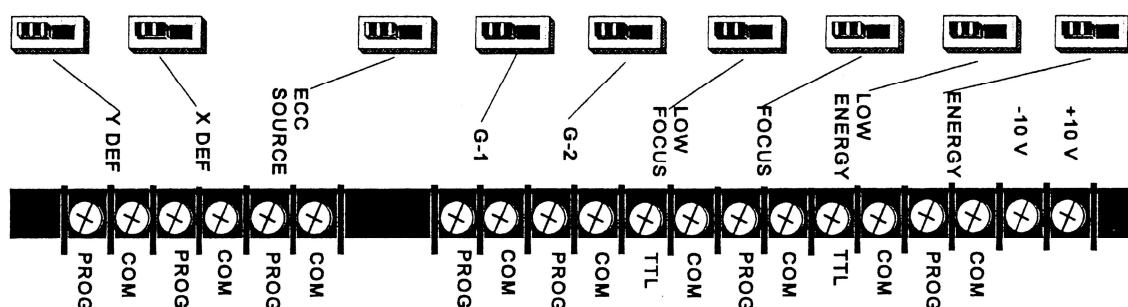


Figura 2.16. Interruptores Local/Remote vistos en modo local, con sus respectivos terminales exteriores.

El cañón de electrones ELG-2B-5352 dispone de diferentes elementos que proporcionan y controlan el haz de electrones: cátodo, rejilla (G-1), ánodo (G-2), Focalización y deflexión. En la Figura 2.17 se presenta un esquema del cañón de electrones y los diferentes elementos que lo componen:

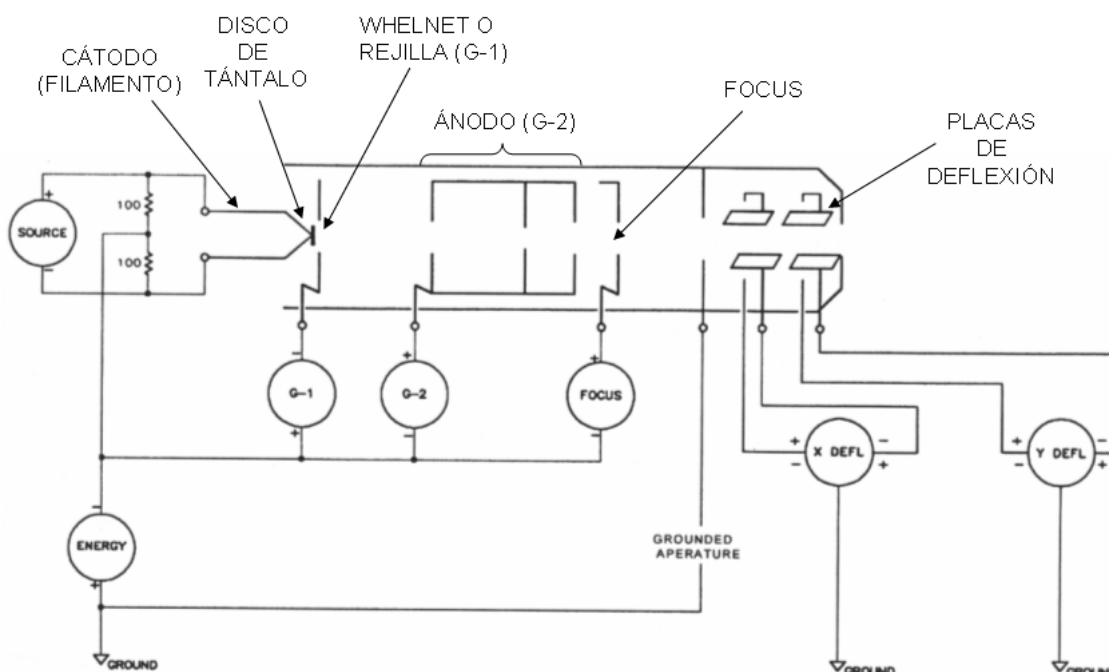


Figura 2.17. Diagrama de bloques del cañón de electrones ELG-2

El cátodo, rejilla (G-1), ánodo (G-2) y Focalización están flotando a una tensión negativa (0 a -1000 V). Las fuentes de alimentación de energía y deflexión van a tierra.

A continuación se explican con más detalle las características de los diferentes elementos del cañón de electrones y su función:

2.3.3. Cátodo.

El cátodo es el elemento del cañón que emite los electrones. Los componentes del cátodo son el filamento de metal refractario (tungsteno), un disco de metal termoiónico (tántalo) y una fuente de tensión (SOURCE) que proporciona un máximo de 2V y 2A.

El filamento tiene una estructura similar a la de una horquilla y sujeta al disco de tántalo. Cuando la fuente de tensión (SOURCE) calienta el filamento, éste a su vez calienta el disco de tántalo y se emiten los electrones. La emisión de los electrones es función tanto de la temperatura del cátodo como del campo eléctrico creado entre el ánodo (G-2) y el cátodo.

En la Figura 2.18.a) se representa la emisión de electrones frente a la temperatura del cátodo. Se observa la emisión de electrones del cátodo como función de la temperatura manteniendo constante la diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo. En la Figura 2.18.b) se representa la emisión de electrones frente a la tensión del ánodo (G-2). En este caso se observa que, manteniendo la temperatura del cátodo constante, la emisión de electrones aumenta en función de la tensión en el ánodo (G-2).

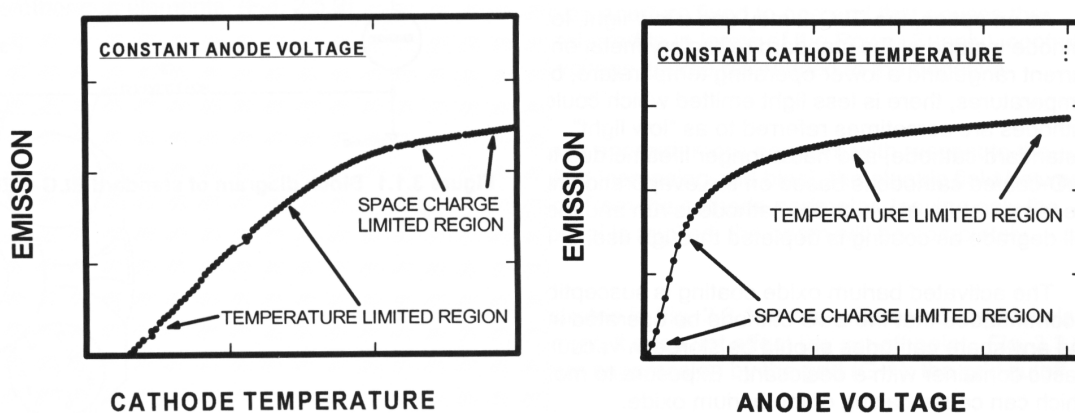


Figura 2.18. a) Emisión de electrones frente a la temperatura del cátodo manteniendo la tensión en G-2 constante

b) Emisión de electrones frente a la tensión del ánodo (G-2) manteniendo la temperatura del cátodo constante

2.3.4. Wehnelt o Rejilla (G-1).

El Wehnelt o Rejilla es una estructura tubular con una abertura situada en uno de los extremos del cátodo. Su función es la de regular la emisión de electrones procedentes del disco de tántalo. El potencial de la rejilla está controlado por una fuente de voltaje (G-1 en la Figura 2.19) referenciada al negativo de la fuente de Energía.

Incrementando el potencial de la rejilla (G-1) se consigue que la abertura de la rejilla sea más negativa respecto al cátodo. A medida que aumenta el potencial de la rejilla, el campo eléctrico entre el cátodo y la rejilla suprime la emisión de electrones del perímetro del disco de tántalo, permitiendo que emita únicamente desde su centro. Si se aplica suficiente voltaje a la rejilla, el haz será suprimido completamente.

En la Figura 2.19.a) se representa la emisión de corriente frente al voltaje de la rejilla, donde se puede observar el efecto de corte para High Energy y Low Energy. La Figura 2.19.b) representa la emisión de corriente frente al voltaje para diferentes potenciales en el ánodo (G-2). Se observa que el punto de corte aumenta en función de la tensión en el ánodo.

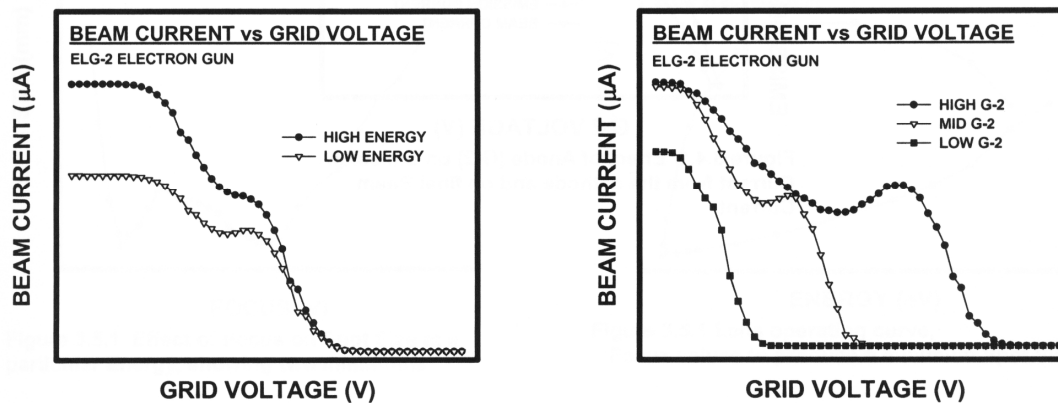


Figura 2.19. a) Emisión de corriente frente al voltaje de la rejilla para High Energy y Low Energy
b) Emisión de corriente frente al voltaje de la rejilla para diferentes potenciales en el ánodo (G-2)

2.3.5. Ánodo (G-2).

El ánodo (G-2) consiste en un tubo con tres aberturas. El potencial del ánodo es controlado por una fuente de voltaje positivo referenciada al negativo de la fuente de Energía tal como se vio en el esquema de la Figura 2.17. La magnitud y dirección del campo eléctrico creado por la diferencia de potencial entre el cátodo y el ánodo (G-2) determina el número de electrones emitidos por el cátodo. Cuanto mayor es la tensión del ánodo, mayor es la corriente de emisión y, por tanto, la corriente del haz, como se refleja en la Figura 2.20.

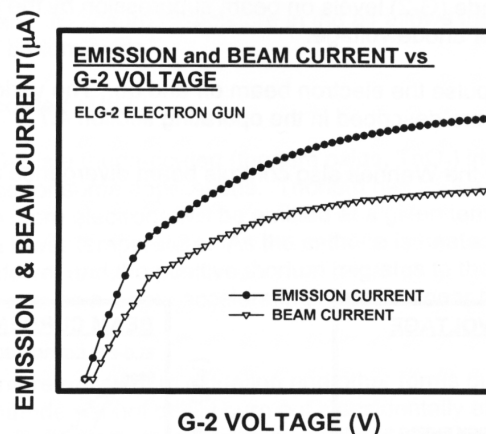


Figura 2.20. Emisión y corriente frente al voltaje del ánodo (G-2)

2.3.6. Focus.

El Focus, conjuntamente con los potenciales de los otros elementos anteriormente descritos, afecta al tamaño del *spot*. La función del Focus es la de controlar el diámetro del haz de electrones cuando éste se aproxima a la apertura final del cañón de electrones.

El Focus está controlado por una fuente de voltaje referenciada al negativo de la fuente de Energía. Al incrementar el potencial del Focus hacemos que éste sea más positivo respecto al cátodo.

La Figura 2.21 a) representa el tamaño del *spot* frente al Focus para una Energía constante. Se observa cómo están relacionados el Focus y el tamaño del punto luminoso, ya que para cada valor de Focus se obtiene un tamaño del *spot* distinto.

Los valores del Focus que producen un tamaño de *spot* mínimo para diferentes energías están representados en la Figura 2.21 b). Observamos que puede haber dos valores de Focus que proporcionen un tamaño de *spot* mínimo.

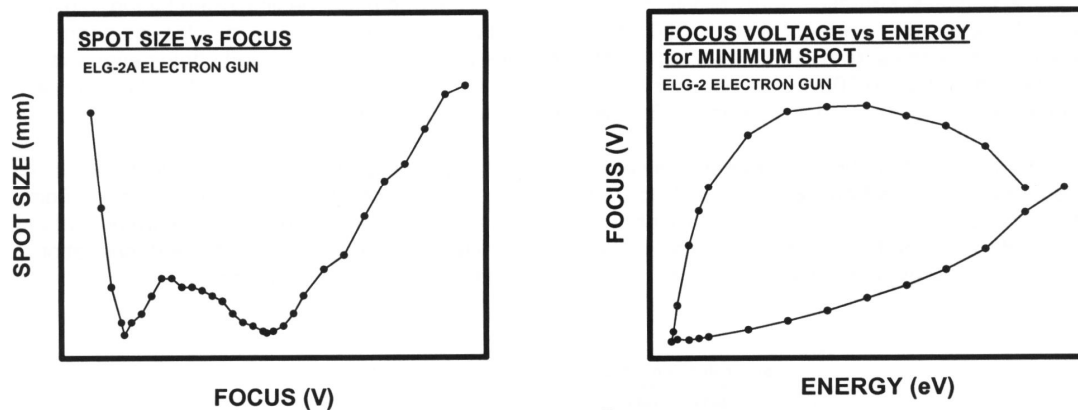


Figura 2.21. a) Tamaño del *spot* frente al Focus para una Energía constante
b) Valores de Focus que proporcionan un tamaño de *spot* mínimo

2.3.7. Deflexión.

La deflexión consiste en dos pares (X e Y) de placas de deflexión (Figura 2.22) localizadas en el extremo del cañón de electrones. Las tensiones aplicadas a estas placas producen una fuerza desviadora en un plano perpendicular a la dirección de los electrones, permitiendo al operario guiar el haz hacia su objetivo.

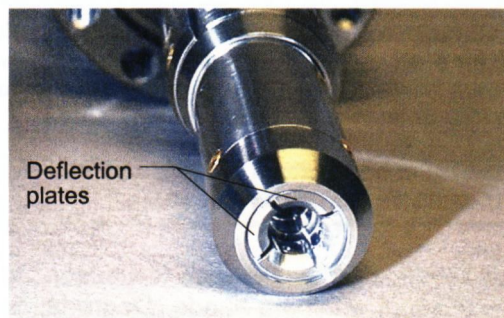


Figura 2.22. Placas de deflexión del cañón de electrones ELG-2

2.3.8. Parámetros típicos de operación.

Los parámetros de operación recomendados para un buen funcionamiento del equipo son los indicados en la tabla 2.4:

Nivel de vacío		$1 \cdot 10^{-5}$ torr		
<u>Tensiones iniciales de polarización</u>	<u>Fuente de alimentación</u>	<u>G-1(rejilla)</u>	G-2 (ánodo)	Foco
	<u>Rango</u>	0 a -25 V	0 a +100 V	0 a +1000 V
	<u>Ajuste inicial recomendado</u>	0 V	50 V	500 V
	<u>Referencia</u>	Filamento	Filamento	Filamento
<u>Corriente filamento</u>		Rango típico de operación: 1.50 A a 1.70 A Corriente máxima recomendada: 1.75 A		

Tabla 2.4. Parámetros de operación para el cañón d electrones ELG-2

2.3.9. Dimensiones.

Las dimensiones estándar del cañón de electrones ELG-2 son las esquematizadas en la Figura 2.23.

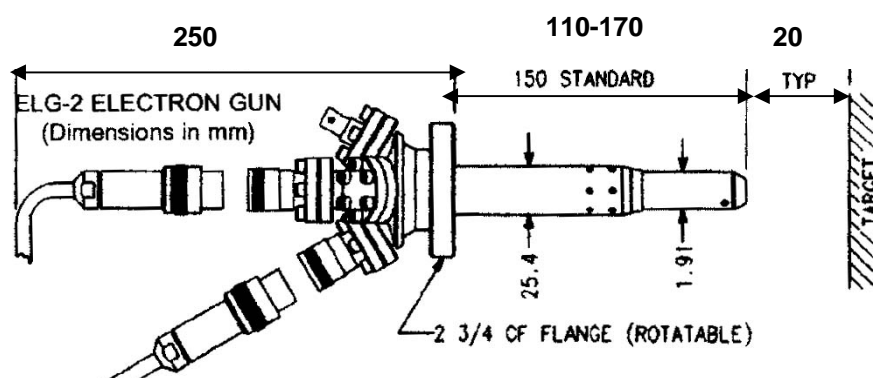


Figura 2.23. Dimensiones del cañón de electrones ELG-2 (mm)

2.3.10. Modos de funcionamiento del cañón de electrones. Relaciones Energía-Focus para obtener el mínimo *spot* del haz en la muestra.

El cañón de electrones ELG-2 nos permite realizar medidas en función de la Energía, el tamaño del *spot* y el Focus. En las especificaciones técnicas del cañón disponemos de dos tablas de datos donde podemos comprobar la relación entre Focus y Energía, o entre el tamaño del *spot* y el Focus.

Los tres tipos de medida que utilizaremos en nuestro proyecto son las siguientes:

- **Barrido en Energía y Focalización constante.** Se realiza un barrido en Energía entre dos valores propuestos por el usuario mientras que la Focalización se mantiene a un valor constante también fijado de antemano.
- **Barrido en Focus y Energía constante.** En este caso mantenemos la Energía constante y el barrido se realiza entre dos valores de Focalización.
- **Barrido en Energía manteniendo el Focus en el valor que proporciona el menor tamaño del *spot*.** Esta opción nos permite hacer un barrido de Energía pero manteniendo siempre el mínimo valor posible de *spot*. Podemos ajustar el *spot* en función de una recta o de un polinomio extraído de la curva que nos proporciona el fabricante (Figura 2.24).
 - **Recta $F=a + bE$** (parámetros “a” y “b”).
 - **Polinomio.**

En la Figura 2.24 se muestra la relación entre el Focus y la Energía para obtener el tamaño de *spot* mínimo a unas determinadas condiciones.

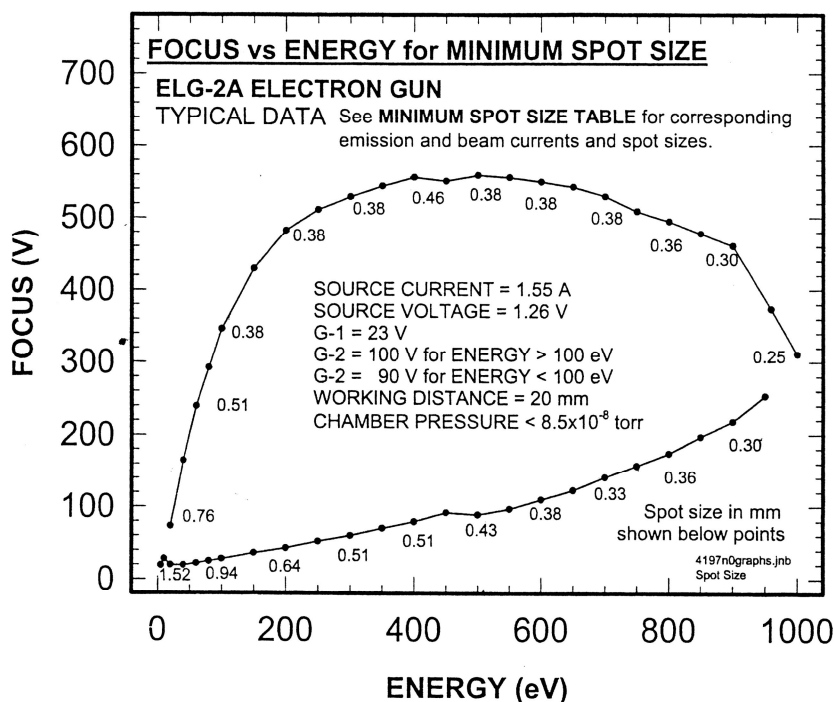


Figura 2.24. Representación de voltaje del Focus (V) frente a la Energía (eV)

En la Figura 2.25 se representa el tamaño del *spot* frente al voltaje del Focus para una Energía constante de 750 eV. Se observa que al aumentar la tensión del Focus el tamaño del *spot* varía y no se mantiene constante.

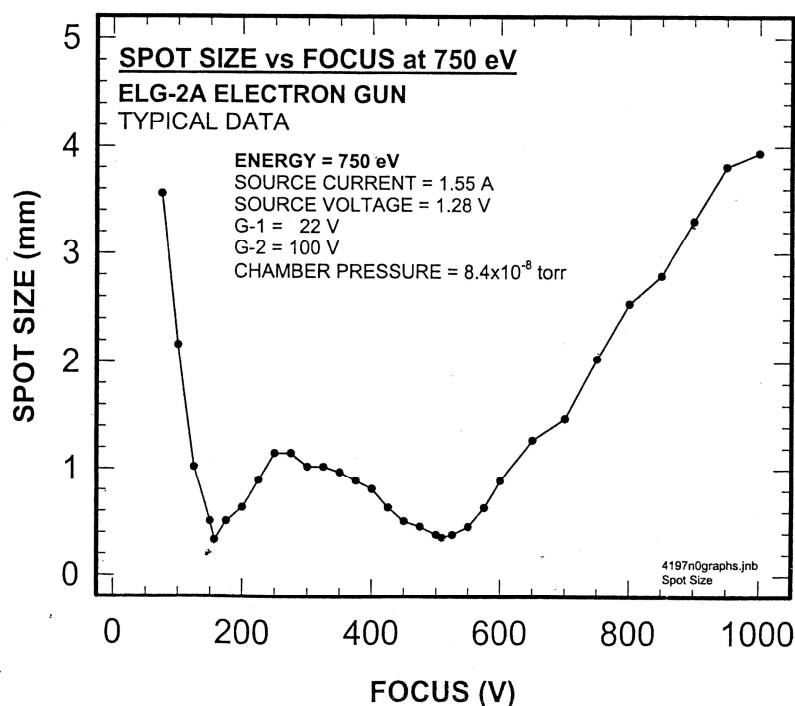


Figura 2.25. Representación del tamaño del *spot* (mm) frente al Focus (V)

Los valores de la tensión del Focus que hacen mínimo el diámetro del haz de electrones son dos: uno de menor tensión que aumenta aproximadamente de forma lineal con la Energía, y el otro, de mayor tensión, lo hace de forma parabólica como se representa en la Figura 2.24.

2.4. Características del Picoamperímetro Keithley. Comunicación a través de una interfaz GPIB.

El picoamperímetro Keithley modelo 6487 dispone de un bus programable de alta resolución (RS-232 e IEEE-488). El rango de medición de corriente varía entre los siguientes valores: desde 20 mA hasta 2 nA, los cuales nos proporcionan una precisión de 100 nA hasta 10 fA (Tabla 2.5). También incluye una fuente de tensión DC que suministra hasta ± 500 V (Tabla 2.6).

En nuestro proyecto usaremos el picoamperímetro Keithley 6487 para leer la corriente proveniente de la muestra situada en la campana de ultra-alto vacío. Además se utiliza su fuente de voltaje para fijar el potencial en la muestra. Para comunicar con el PC utilizaremos una tarjeta GPIB-USB-HS que se describe más adelante.

<i>Rango</i>	<i>Lectura máxima</i>	<i>5½ -Digit Resolution</i>
2nA	± 2.1 nA	10fA
20nA	± 21 nA	100fA
200nA	± 210 nA	1pA
2uA	± 2.1 μ A	10pA
20uA	± 21 μ A	100pA
200uA	± 210 μ A	1nA
2mA	± 2.1 mA	10nA
20mA	± 21 mA	100nA

Tabla 2.5. Capacidades de medida de corriente del modelo 6487

<i>Rango</i>	<i>Salida máxima</i>	<i>Step Size</i>
10V	± 10.1 V	200 μ V
50V	± 50.5 V	1mV
500V	± 505 V	10mV

Tabla 2.6. Capacidades de la fuente de voltaje del modelo 6487

2.4.1. Panel frontal del Picoamperímetro Keithley 6487.

En la Figura 2.26 se muestra el panel frontal del Picoamperímetro Keithley 6487:

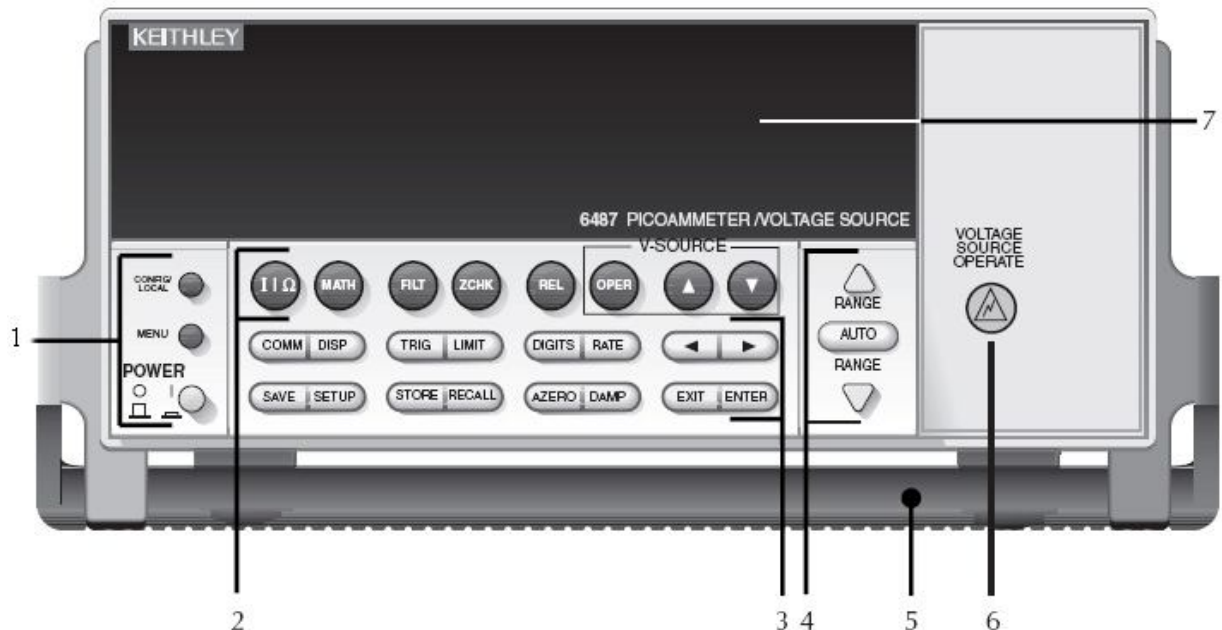


Figura 2.26. Panel frontal del modelo 6487

A continuación se describen los diferentes controles del panel frontal del Picoamperímetro modelo 6487:

NOTA Para modificar las propiedades de un botón, presione el botón CONFIG / LOCAL (ver *Special keys and power switch*) y después el botón. No todos los botones tienen propiedades configurables.

1. Special keys and power switch.

CONFIG/	Cuando opera en modo Local, se utiliza para configurar las propiedades del siguiente botón pulsado.
LOCAL	Cuando opera en modo remoto (aparece REM en el display), cancela el control remoto de la GPIB.
MENU	Permite acceso al menú.
POWER	Interruptor de encendido/apagado. En la posición I enciende el picoamperímetro 6487, en la posición O lo apaga.

2. Function keys.

IΩ	Utilizado para seleccionar entre medida de corriente o de resistencia.
MATH	Activa la función Math seleccionada.
FILT	Activa el Filtering.
ZCHK	Activa la función Zero Check.
REL	Se usa para controlar y configurar las propiedades de la función Rel(ative).



2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS E INSTRUMENTACIÓN

OPER	Conecta o desconecta la fuente de voltaje (el estado de la fuente de voltaje se ve a través de un indicador de color azul).
V-SOURCE ¹	Incrementa el valor de la fuente de voltaje.
V-SOURCE <i>f</i>	Disminuye el valor de la fuente de voltaje.

3. Operation keys.

COMM	Se utiliza para controlar y modificar las propiedades de comunicación (GPIB o RS-232).
DISP	Utilizado para activar o desactivar el display.
TRIG	Medida/as del trigger. Saca al 6487 del estado inactivo. Usado también para configurar las propiedades del trigger.
LIMIT	Utilizado para diseñar y crear test de límites.
DIGITS	Se usa para seleccionar la resolución del display.
RATE	Utilizado para seleccionar el rango de medida.
ß and ©	Se utiliza para controlar la posición del cursor en la selección o edición de valores.
SAVE	Utilizado para salvar la configuración actual.
SETUP	Usado para reinicializar la GPIB a su configuración por defecto.
STORE	Utilizado para iniciar el buffer y modificar el número de lecturas que debe guardar.
RECALL	Usado para visualizar el número de lecturas almacenadas (incluyendo máximo, mínimo, pico a pico, media y desviación estándar).
AZERO	Usado para controlar la función auto zero (on / off).
DAMP	Utilizado para controlar la función damping (on / off).
EXIT	Usado para cancelar la selección y regresar a la pantalla de medida.
ENTER	Se usa para aceptar la selección y continuar a la siguiente elección o regresar a la pantalla de medida.

4. Range keys.

¹	Se usa para seleccionar el rango más alto de la próxima medida. También se utiliza para modificar el límite más alto del autorango.
<i>f</i>	Utilizado para seleccionar el rango más bajo de la próxima medida. También se utiliza para modificar el límite más bajo del autorango.
AUTO	Activa/desactiva el autorango.

5. Handle.

Tirar y mover a la posición deseada.

6. VOLTAGE SOURCE OPERATE indicator.

Este indicador se encenderá cuando la fuente de voltaje esté operativa (y se apagará cuando la fuente deje de estar operativa).

2.4.2. Panel trasero del Picoamperímetro Keithley 6487.

En la Figura 2.27 se muestra el panel trasero del Picoamperímetro Keithley modelo 6487:

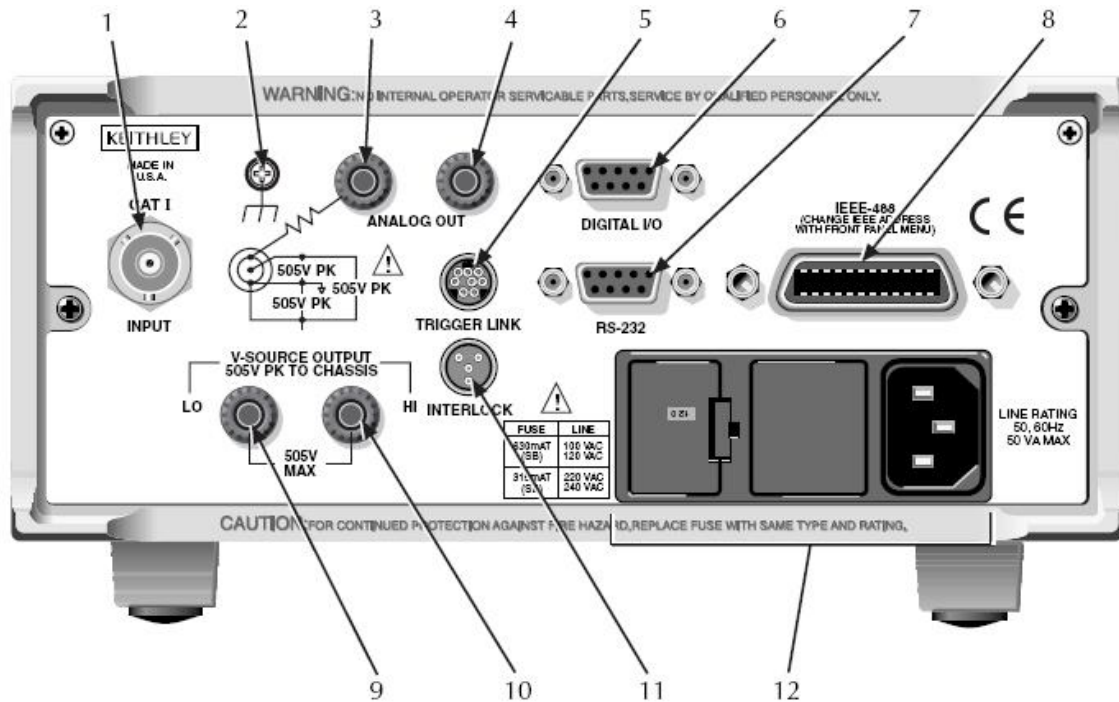


Figura 2.27. Panel trasero del modelo 6487

A continuación se describen los diferentes conectores del panel trasero del Picoamperímetro 6487:

1. INPUT.

Conector coaxial de tres puntas hembra utilizado para conectar la señal que debe ser medida a la entrada del modelo 6487. Se acopla a un conector coaxial de tres puntas macho.

2. CHASSIS.

Este terminal se utiliza para conectar la carcasa a tierra.

3. COMMON.

Este conector banana puede ser usado como una entrada LO o como el común para la salida ANALOG OUT. También puede ser usado como toma de tierra. Advierta que hay una resistencia de 1k (ohm) en la entrada LO desde el común de ANALOG OUT.

4. ANALOG OUT.

Salida analógica. Utiliza un conector banana.



5. TRIGGER LINK.

Conector de ocho pines micro-DIN utilizado para enviar y recibir pulsos del trigger entre los instrumentos conectados. Utiliza un cable o adaptador trigger, como los modelos 8501-1, 8501-2, 8502, y 8503.

6. DIGITAL I/O.

Entradas y salidas digitales. Utiliza un conector macho DB-9.

7. Bus RS-232.

Conector hembra DB-9 para operaciones RS-232.

8. Bus IEEE-488.

Conector para operaciones IEEE-488 (GPIB). Utiliza un cable apantallado, como los modelos 7007-1 y 7007-2.

9. V-SOURCE OUTPUT LO.

Conector banana que proporciona una conexión LO a la fuente de voltaje del picoamperímetro 6487.

10. V-SOURCE OUTPUT HI.

Conector banana que proporciona una conexión HI a la fuente de voltaje del picoamperímetro 6487.

11. INTERLOCK.

Conector de bloqueo para altas tensiones de la fuente de voltaje.

12. Power Module.

Contiene el receptáculo de la tensión de línea AC y los fusibles. El instrumento puede ser configurado para tensiones de línea de 115V y 230VAC (nominales) a las frecuencias de línea de 50 o 60Hz automáticamente y sobre el bus. Cambiar la tensión de línea requiere cambiar los fusibles.

2.4.3. Interlock.

En nuestro proyecto hemos configurado la fuente de voltaje del picoamperímetro en un rango de 500 V. El modelo 6487 dispone de un interlock que trabaja conjuntamente con la fuente de voltaje. El interlock impide que la fuente de voltaje opere en el rango de 50 V y 500 V para que la operación sea más segura para el usuario y el equipo conectado. En nuestro proyecto utilizamos la fuente del picoamperímetro en el rango de 500 V, por tanto se ha tenido que desbloquear el interlock, para ello se realizan las conexiones que se muestran en la Figura 2.28.

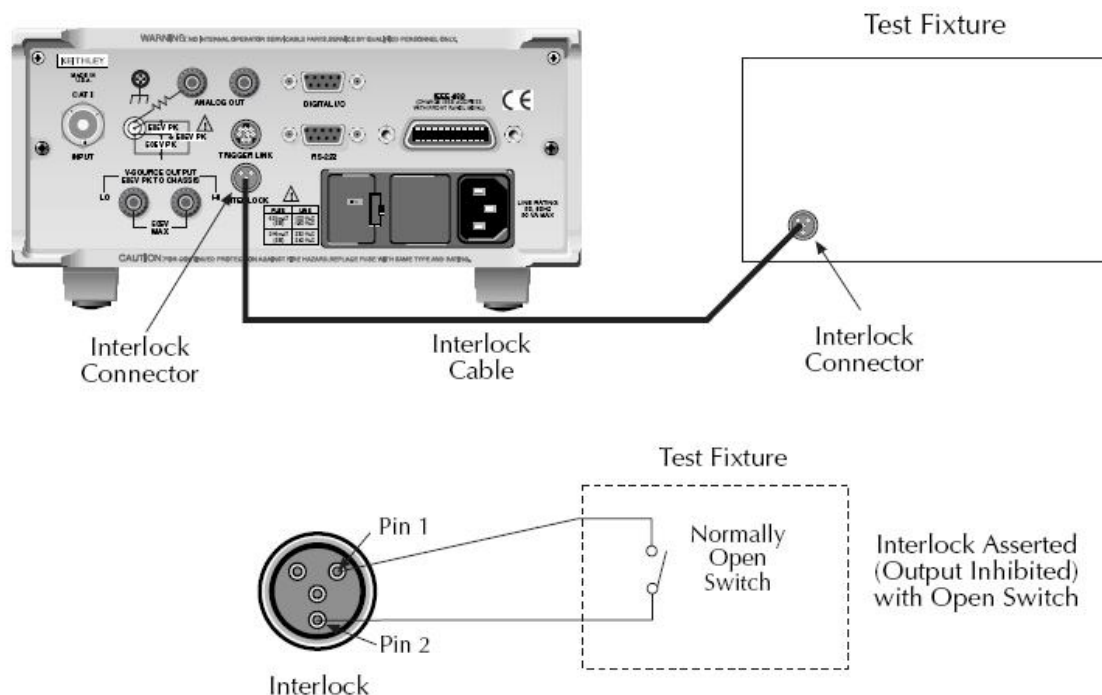


Figura 2.28. Conexiones del interlock en el picoamperímetro 6487

2.4.4. GPIB-USB-HS.

Para comunicar el picoamperímetro Keithley modelo 6487 con el PC utilizamos una tarjeta GPIB-USB-HS de National Instruments (Figura 2.29). La tarjeta GPIB-USB-HS transforma cualquier PC con un puerto USB en un controlador completo IEEE488.2 plug-and-play para hasta 14 instrumentos GPIB programables. El GPIB-USB-HS aprovecha el USB de alta velocidad para brindar un rendimiento superior de hasta 1.8 MB/s con el protocolo IEEE 488 estándar y 7.2 MB/s con el protocolo IEEE 488 de alta velocidad (HS488).

La tarjeta GPIB se conecta al picoamperímetro por su conector IEEE-488 situado en su panel trasero y al PC a través de un puerto USB estándar.



Figura 2.29. Tarjeta GPIB-USB-HS

Las especificaciones de la tarjeta GPIB-USB-HS se muestran en la Tabla 2.7.

<i>General</i>	
Formato Físico	USB
Soporte para SO	Windows Linux
Compatibilidad con Estándar GPIB	IEEE 488 IEEE 488.1 IEEE 488.2 HS488
Analizador GPIB Interno	No
Chip ASIC interno de GPIB	TNT5004
Soporte para LabVIEW® RT	No
<i>Información del Puerto</i>	
Número de Puertos	1
Máxima Razón de Transferencia (IEEE 488.1)	1.8 MB/s (IEEE 488.1)
Máxima Razón de Transferencia (HS488)	7.2 MB/s (HS488)
Tamaño de Búfer FIFO de E/S	32 B 64 B
Máximas Conexiones de Dispositivos / Puerto	14
Longitud Máxima del Cable	4 m



2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS E INSTRUMENTACIÓN

Requerimientos de Potencia	
Voltaje	5 VDC
Corriente	500 mA
Fuente de Potencia	Energizado Internamente
Especificaciones Físicas	
Longitud	10.7 cm
Ancho	6.6 cm
Altura	2.6 cm
Conector de E/S	24-pin IEEE 488
Temperatura de Operación	0..55 °C

Tabla 2.7. Especificaciones de la tarjeta GPIB-USB-HS

2.5. Control de la fuente (PC + Tarjeta PCI-6024E).

2.5.1. PC.

En esta aplicación las características del PC no han sido muy exigentes, debido a que todo el trabajo recae directamente en la tarjeta de adquisición de datos, y el actual bus PCI es sobradamente suficiente para garantizar la transferencia de datos. Tan sólo se recomienda una cantidad de memoria mínima de 32 MB que garantice un procesamiento y presentación de los datos rápidos tras la adquisición. Por tanto, un equipo relativamente actual ha sido suficiente.

Las características más relevantes del PC usado son:

- Procesador Intel Pentium 2.80 GHz.
- Disco duro de 75 GB.
- Monitor de 15".
- 1 GB de memoria RAM.

2.5.2. Tarjeta PCI-6024E.

Se trata de uno de los elementos más importantes de este proyecto. LabVIEW® es un software desarrollado por National Instruments, el fabricante de la tarjeta de adquisición de datos. Esto tiene la ventaja de que evitamos problemas de compatibilidad entre software y hardware.

En nuestro proyecto la tarjeta de adquisición de datos PCI-6024E (Figura 2.30) tiene la función de controlar en modo remoto la Energía y el Focus de la fuente Kimball a través de los terminales situados en su parte posterior que se describieron anteriormente.

En el capítulo 3 se explica en detalle cómo se suministra la señal de alimentación a la fuente.



Figura 2.30. Tarjeta PCI-6024E

El modelo de tarjeta es el PCI-6024E y presenta las características indicadas en la Tabla 2.8.

<i>General</i>	
Formato Físico	PCI
Soporte para SO	Windows, Real-Time, Linux, Mac OS
Familia de Productos DAQ	Serie E
Soporte para LabVIEW[®] RT	Sí
<i>Entrada Analógica</i>	
Número de Canales	16 SE/8 DI
Velocidad de Muestreo	200 kS/s
Resolución	12 bits
Muestreo Simultáneo	No
Rango de Voltaje Máximo	-10..10 V
Precisión del Rango	16.504 mV
Rango de Voltaje Mínimo	-50..50 mV
Precisión del Rango	0.106 mV
Número de Rangos	4
Memoria Interna	512 muestras
<i>Salida Analógica</i>	
Número de Canales	2
Razón de Actualización	10 kS/s
Resolución	12 bits



2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS E INSTRUMENTACIÓN

Rango de Voltaje Máximo	-10..10 V
Precisión del Rango	8.127 mV
Rango de Voltaje Mínimo	-10..10 V
Precisión del Rango	8.127 mV
Capacidad de Corriente (Canal/Total)	5 mA
<i>E/S Digital</i>	
Número de Canales	8 DIO
Temporización	Software
Niveles Lógicos	TTL
Máximo Rango de Entrada	0..5 V
Máximo Rango de Salida	0..5 V
Entrada de Flujo de Corriente	Sinking, Sourcing
Filtros de Entrada Programables	No
Salida de Flujo de Corriente	Sinking, Sourcing
Capacidad de Corriente (Canal/Total)	24 mA/192 mA
Temporizador Watchdog	No
¿Soporta Estados de Encendido Programables?	No
¿Soporta Protocolo de Sincronización para E/S?	No
¿Soporta E/S de Patrones?	No
<i>Contadores/Temporizadores</i>	
Número de Contadores/Temporizadores	2
Resolución	24 bits
Frecuencia Máxima de la Fuente	20 MHz
Entrada Mínima de Ancho de Pulso	10 ns
Niveles Lógicos	TTL
Rango Máximo	0..5 V
Estabilidad de Tiempo	100 ppm
Sincronización GPS	No
Generación de Pulso	Sí
Operaciones a Búfer	Sí
Eliminación de Rebotes	No
Número de Canales DMA	1

<i>Temporización/Disparo/Sincronización</i>	
Bus de Sincronización (RTSI)	Sí
Disparo	Digital
<i>Especificaciones Físicas</i>	
Longitud	17.5 cm
Ancho	10.7 cm
Conector de E/S	SCSI macho de 68 pines tipo II

Tabla 2.8. Especificaciones de la tarjeta PCI-6024E

Además, se dispone del siguiente material:

- Placa de conexión CB-68LP (Figura 2.31) con conector SCSI macho de 68 pines para conexión directa con cables de 68 pines. Dispone de 68 terminales de tornillo.
- Cable de 68 pines R6868 Ribbon I/O para conectar la tarjeta *PCI-6024E* y la placa de conexión CB-68LP (Figura 2.32).
- Software LabVIEW[®] 8.1 de National Instruments.
- Software NI-DAQ Driver software versión 6.6 de National Instruments, el cual se encarga de proporcionar los “drivers” para la tarjeta de adquisición bajo un entorno gráfico sencillo.



Figura 2.31. Placa de conexión CB-68LP con clema de 68 pines



Figura 2.32. Cable R6868 Ribbon I/O

ACH8	34	68	ACH0
ACH1	33	67	AIGND
AIGND	32	66	ACH9
ACH10	31	65	ACH2
ACH3	30	64	AIGND
AIGND	29	63	ACH11
ACH4	28	62	AISENSE
AIGND	27	61	ACH12
ACH13	26	60	ACH5
ACH6	25	59	AIGND
AIGND	24	58	ACH14
ACH15	23	57	ACH7
DAC0OUT1	22	56	AIGND
DAC1OUT1	21	55	AOGND
RESERVED	20	54	AOGND
DIO4	19	53	DGND
DGND	18	52	DIO0
DIO1	17	51	DIO5
DIO6	16	50	DGND
DGND	15	49	DIO2
+5 V	14	48	DIO7
DGND	13	47	DIO3
DGND	12	46	SCANCLK
PFI0/TRIG1	11	45	EXTSTROBE*
PFI1/TRIG2	10	44	DGND
DGND	9	43	PFI2/CONVERT*
+5 V	8	42	PFI3/GPCTR1_SOURCE
DGND	7	41	PFI4/GPCTR1_GATE
PFI5/UPDATE*	6	40	GPCTR1_OUT
PFI6/WFTRIG	5	39	DGND
DGND	4	38	PFI7/STARTSCAN
PFI9/GPCTR0_GATE	3	37	PFI8/GPCTR0_SOURCE
GPCTR0_OUT	2	36	DGND
FREQ_OUT	1	35	DGND

¹ Not available on the 6023E

Figura 2.33. Asignación de pines en la tarjeta PCI 6024E. Conector CB-68LP



<p>3. AUTOMATIZACIÓN DEL CONTROL DEL CAÑÓN DE ELECTRONES Y ADQUISICIÓN DE LA CORRIENTE EN MUESTRA</p>
--

3. AUTOMATIZACIÓN DEL CONTROL DEL CAÑÓN DE ELECTRONES Y ADQUISICIÓN DE LA CORRIENTE EN MUESTRA.

En este capítulo se describirá cómo se han conectado los diferentes instrumentos para cumplir los objetivos propuestos. Se detallarán los modos de conexión y la relación entre los instrumentos a partir de un esquema gráfico. Los instrumentos utilizados se describieron en el capítulo anterior y son los siguientes:

- PC.
- Tarjeta DAQ PCI-6024E.
- Tarjeta GPIB-USB-HS.
- Placa de conexión CB-68LP.
- Picoamperímetro Keithley 6487.
- Cañón de electrones Kimball ELG-2 Electro Gun.
- Fuente de alimentación Kimball EGPS-2 Power Supply.

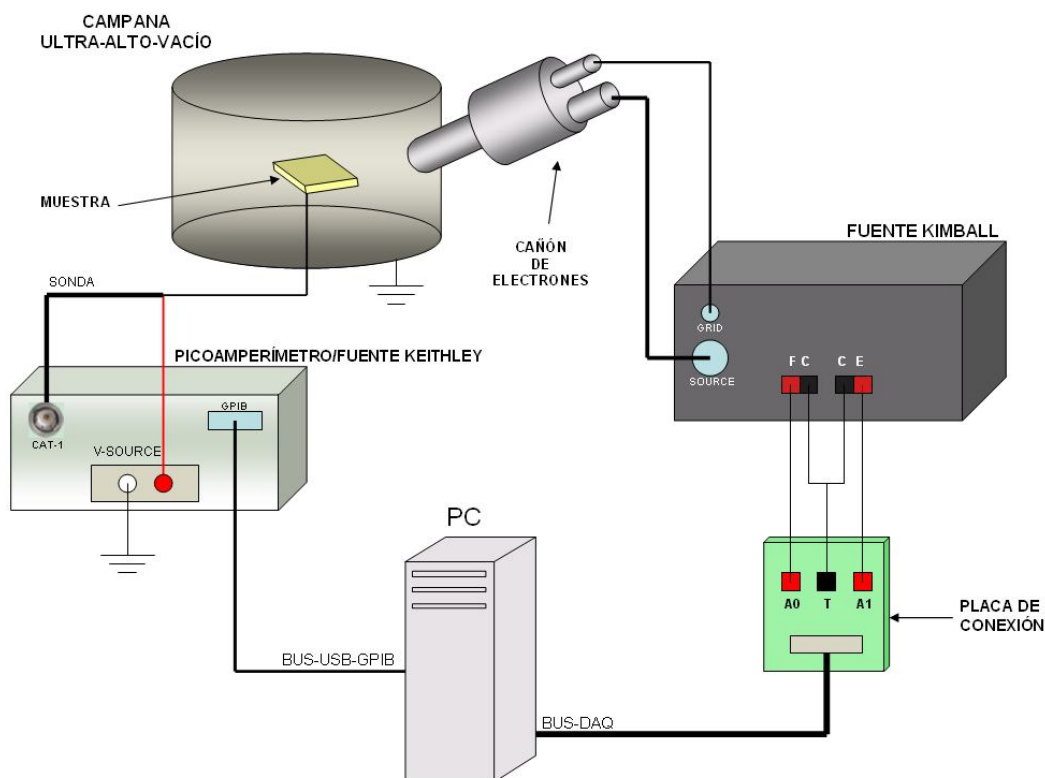


Figura 3.1. Esquema general de la conexión entre el equipo y los instrumentos empleados en el proyecto



3. AUTOMATIZACIÓN DEL CONTROL DEL CAÑÓN DE ELECTRONES Y ADQUISICIÓN DE LA CORRIENTE EN MUESTRA

El objetivo del proyecto es controlar un cañón de electrones que emite un haz de electrones sobre la superficie de una muestra y obtener la medida de corriente en muestra. Para controlar el cañón de electrones y medir la corriente se realizaron las conexiones entre los diferentes instrumentos tal como se muestra en la Figura 3.1.

El cañón de electrones se controla a través de la tensión de Focalización y la Energía que suministra la fuente de alimentación. Para controlar la fuente en modo remoto desde nuestro PC, en su panel trasero dispone de terminales de tornillo a través de los cuales se introduce un voltaje de valores entre 0 y 10 V que tienen su correspondencia con la Energía y la tensión de Focalización que se suministra al cañón de electrones.

Para introducir ese voltaje en los terminales del panel trasero de la fuente disponemos de una tarjeta de adquisición de datos con dos salidas analógicas. El voltaje que suministran esas salidas analógicas se asigna desde el software creado en LabVIEW[®] 8.1.

Por otro lado, para medir la corriente en muestra disponemos de un cable apantallado que se conecta a la muestra aislada, y ese dato se lee con un picoamperímetro. El valor medido por el picoamperímetro se envía al software del PC utilizando una tarjeta GPIB.

En nuestro proyecto hemos considerado la posibilidad de polarizar la muestra para acelerar o decelerar la velocidad de los electrones. Para ello utilizamos la fuente de voltaje de la que dispone el picoamperímetro. Podemos asignarle valores entre -100 y 100 V. El valor de voltaje se le comunica al picoamperímetro desde el software a través de la tarjeta GPIB.

A continuación se describen detalladamente las conexiones realizadas entre los diferentes instrumentos.

PC-DAQ

La tarjeta de adquisición de datos PCI-6024E está integrada en el PC. Para poder acceder a los pines de la tarjeta disponemos de una placa de conexión CB-68LP con conector SCSI macho de 68 pines conectada a la tarjeta PCI-6024E mediante un cable R6868 Ribbon I/O.

En nuestro proyecto utilizamos las dos salidas analógicas de la tarjeta y la toma de tierra. Las salidas analógicas de la tarjeta de adquisición de datos proporcionan un voltaje entre 0 y 10 V.

Con dos cables unifilares estas salidas se conectarán a la fuente de alimentación del cañón a través de los terminales de tornillo de los que dispone la fuente en su panel trasero.

Se han asignado las salidas de la siguiente forma:

- La salida A0 (pin 22) para la Focalización.
- La salida A1 (pin 21) para la Energía.
- La toma de tierra viene por defecto asignada al pin 24.

En la Figura 3.2 se puede ver un esquema de los pines de la placa CB-68LP con las conexiones correspondientes.

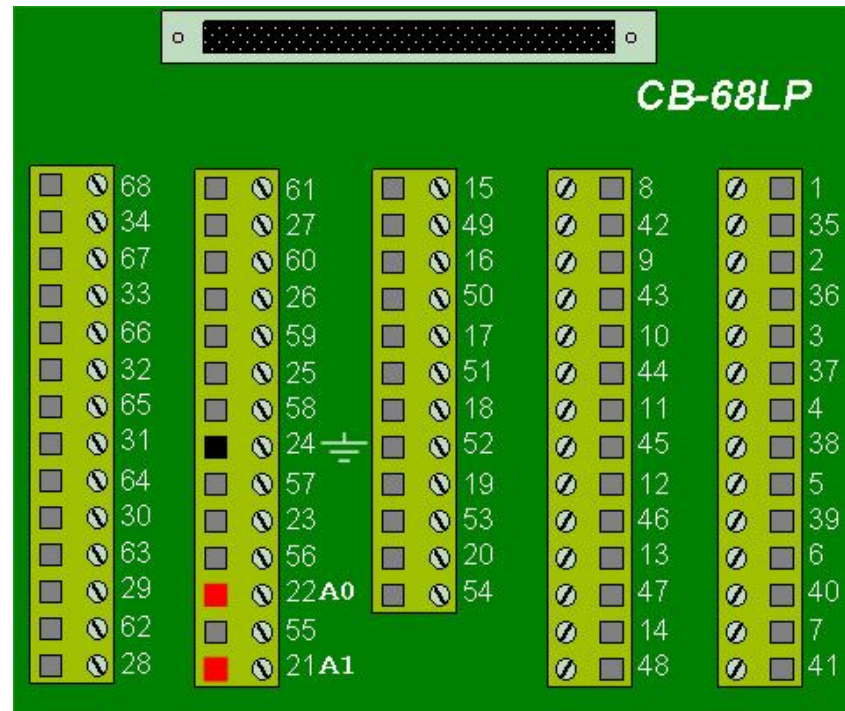


Figura 3.2. Esquema de la placa CB-68LP con las conexiones

DAQ-FUENTE DE ALIMENTACIÓN

Las salidas A0 y A1 (de color rojo) de la tarjeta de adquisición de datos se conectan a la fuente Kimball con dos cables (rojos) a través de los terminales PROG-FOCUS y PROG-ENERGY que se encuentran en su panel trasero, tal y como se explicó en el capítulo 2.

Los cables de tierra (negros) se conectarán a los terminales denominados COM, el de la Energía al terminal COM-ENERGY y el de la Focalización al terminal COM-FOCUS.

Para controlar que la fuente funcione en modo local o remoto, ésta dispone de unos interruptores en su parte interior que tienen su correspondencia en los terminales exteriores ENERGY y FOCUS. En este caso como queremos controlar la Energía y el Focus en modo remoto, los interruptores correspondientes estarán posicionados a la derecha, mientras que el resto seguirán a la izquierda.

En la Figura 3.3 se muestra una imagen de los terminales de tornillo presentes en el panel trasero de la fuente Kimball EGPS-2B tal como quedarían después de haber conectado los cables unifilares.

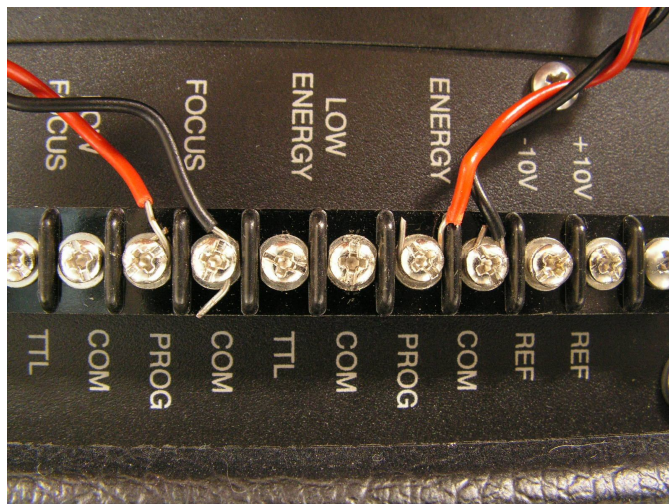


Figura 3.3. Terminales de tornillo de la fuente de energía Kimball con las conexiones

FUENTE DE ALIMENTACIÓN-CAÑÓN DE ELECTRONES

El cañón de electrones está integrado en la campana de ultra-alto vacío y es alimentado por la fuente Kimball EGPS-2B tal como se explicó en el capítulo 2 y cuyas conexiones se pueden ver en la Figura 3.4.

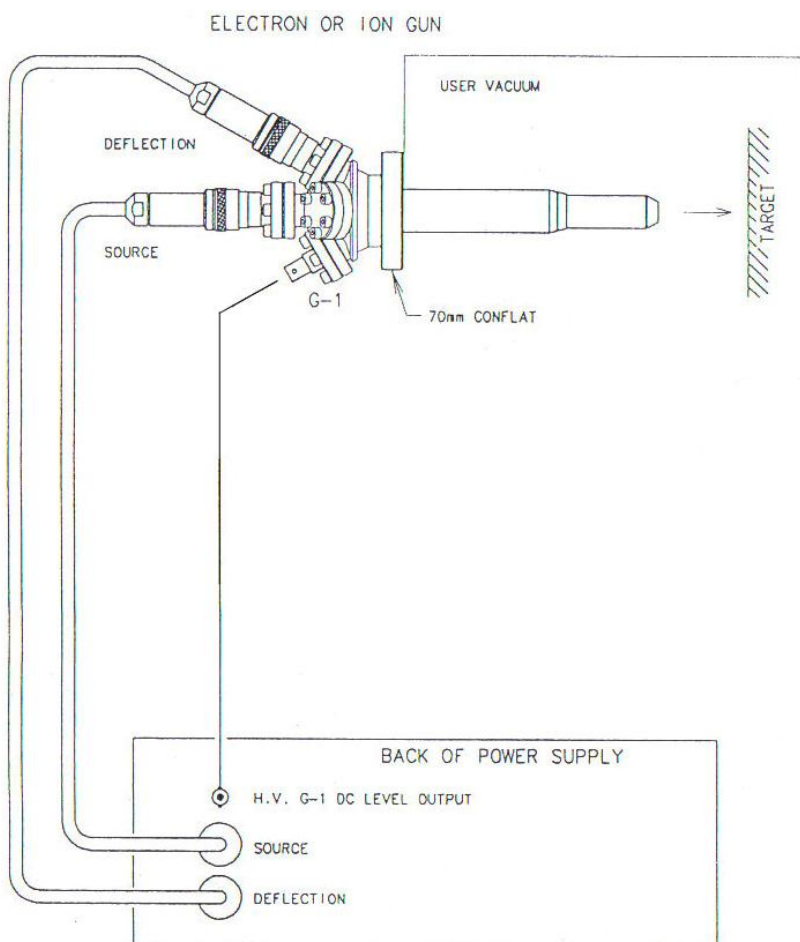


Figura 3.4. Esquema de conexión entre la fuente de alimentación y el cañón de electrones

MUESTRA-PICOAMPERÍMETRO

Una vez que el haz de electrones que emite el cañón incide sobre la muestra colocada en la campana de ultra-alto vacío, se mide la corriente utilizando un cable apantallado. Este cable está aislado de la campana por un material cerámico y se conecta a la muestra a través de una brida DF16S5 tal como se muestra en la Figura 3.5.

En el otro extremo el cable tiene tres terminales, uno de color rojo, otro negro y otro verde que no se utiliza en nuestro proyecto. El terminal rojo del cable apantallado nos da el valor de corriente y se conecta al picoamperímetro Keithley 6487 por la conexión etiquetada CAT-1 de su panel trasero con otro cable que acaba en un conector triax macho.

Para fijar el potencial de la muestra utilizamos la fuente de voltaje de la que dispone el picoamperímetro. La fuente de voltaje tiene dos terminales en el panel trasero del picoamperímetro etiquetados como V-SOURCE OUTPUT. El terminal LO (de color negro) se conecta a tierra, y el terminal HI (de color rojo) se conecta al terminal negro del cable apantallado.

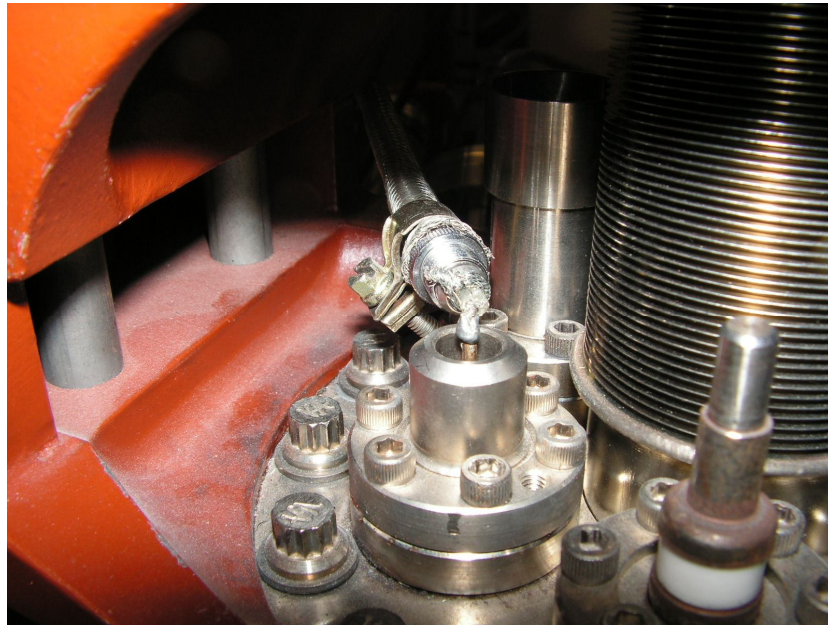


Figura 3.5. Terminal de la campana donde se conecta el cable apantallado que mide la corriente

En la Figura 3.6 se muestra cómo quedaría el esquema eléctrico del cañón de electrones y la muestra conectada al picoamperímetro y la fuente de voltaje.

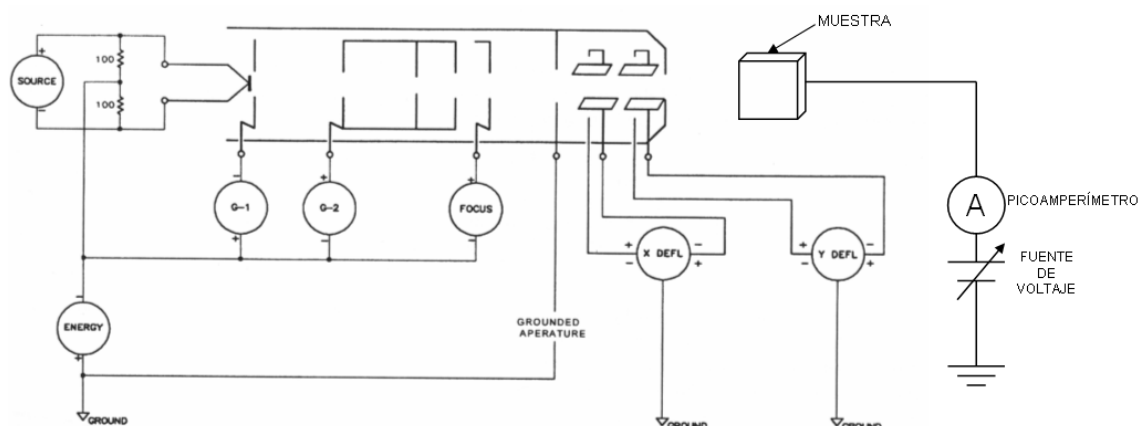


Figura 3.6. Esquema eléctrico de las conexiones del cañón y la muestra

PICOAMPERÍMETRO-PC

El picoamperímetro se comunica con el PC a través de una tarjeta GPIB-USB-HS. Dicha tarjeta se conecta al picoamperímetro por la conexión IEEE-488 de su panel trasero, y al PC por un puerto USB estándar.

En la Figura 3.7 se puede ver la tarjeta GPIB conectada al picoamperímetro, además de las conexiones de la fuente de voltaje y el terminal CAT-1.

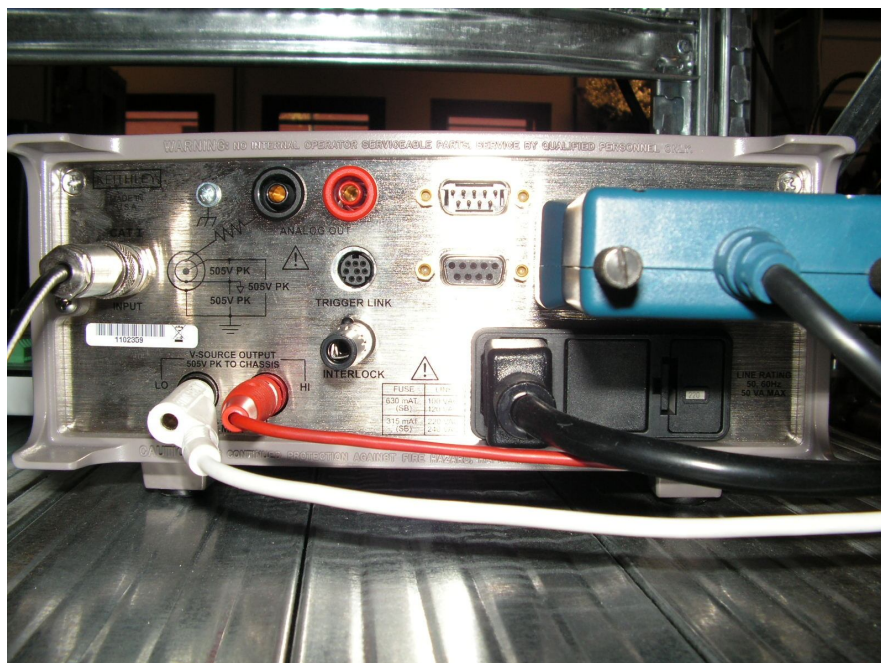


Figura 3.7. Panel trasero del picoamperímetro Keithley 6487 con la tarjeta GPIB-USB-HS conectada



<p>4. SOFTWARE PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA LABVIEW®</p>



4. SOFTWARE PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA LABVIEW®.

4.1. Introducción.

Para el desarrollo de la aplicación que automatiza el control del cañón de electrones se ha utilizado la plataforma de software LabVIEW® 8.1 de National Instruments. Se trata de un entorno de programación gráfico que proporciona la flexibilidad y funcionalidad de un lenguaje de programación textual estándar como puede ser C para la adquisición y control de datos, así como para su análisis y presentación. Miles de ingenieros, científicos y técnicos utilizan LabVIEW® para generar soluciones a las necesidades que demandan en cada momento.

Algunas de las características que hacen de LabVIEW® una buena opción para desarrollar nuestra aplicación son:

- Los programas creados en LabVIEW® consumen pocos recursos del PC, por lo que éste puede realizar otras tareas simultáneamente, no está ocupado en exclusiva con nuestra aplicación.
- Se pueden crear ejecutables para trasladar la aplicación creada a otra computadora.
- En caso de tener la necesidad de cambiar el instrumental utilizado en el laboratorio, nuestra aplicación se puede adaptar de modo muy sencillo al nuevo instrumental.
- Permite controlar de forma sencilla la tarjeta GPIB y la tarjeta de adquisición de datos (DAQ).

LabVIEW® también proporciona potentes herramientas que facilitan la depuración de los programas.

Los programas desarrollados mediante LabVIEW® se denominan *Instrumentos Virtuales (VIs)*, porque su apariencia y funcionamiento imitan los de un instrumento real. Sin embargo son análogos a las funciones creadas con los lenguajes de programación convencionales. Los *VIs* tienen una parte interactiva con el usuario y otra parte de código fuente, y aceptan parámetros procedentes de otros *VIs*.

Todos los *VIs* tienen un *panel frontal* y un *diagrama de bloques*. A continuación se procederá a realizar una breve descripción de estos conceptos.

a) Panel Frontal

Se trata de la interfaz gráfica del *VI* con el usuario (Figura 4.1). Esta interfaz recoge las entradas procedentes del usuario y representa las salidas proporcionadas por el programa. Un *panel frontal* está formado por una serie de botones, pulsadores, potenciómetros, gráficos, etc. Cada uno de ellos puede estar definido como un *control* o



4. SOFTWARE PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA LABVIEW®

un *indicador*. Los primeros sirven para introducir parámetros al VI, mientras que los indicadores se emplean para mostrar los resultados producidos, ya sean datos adquiridos o resultados de alguna operación.

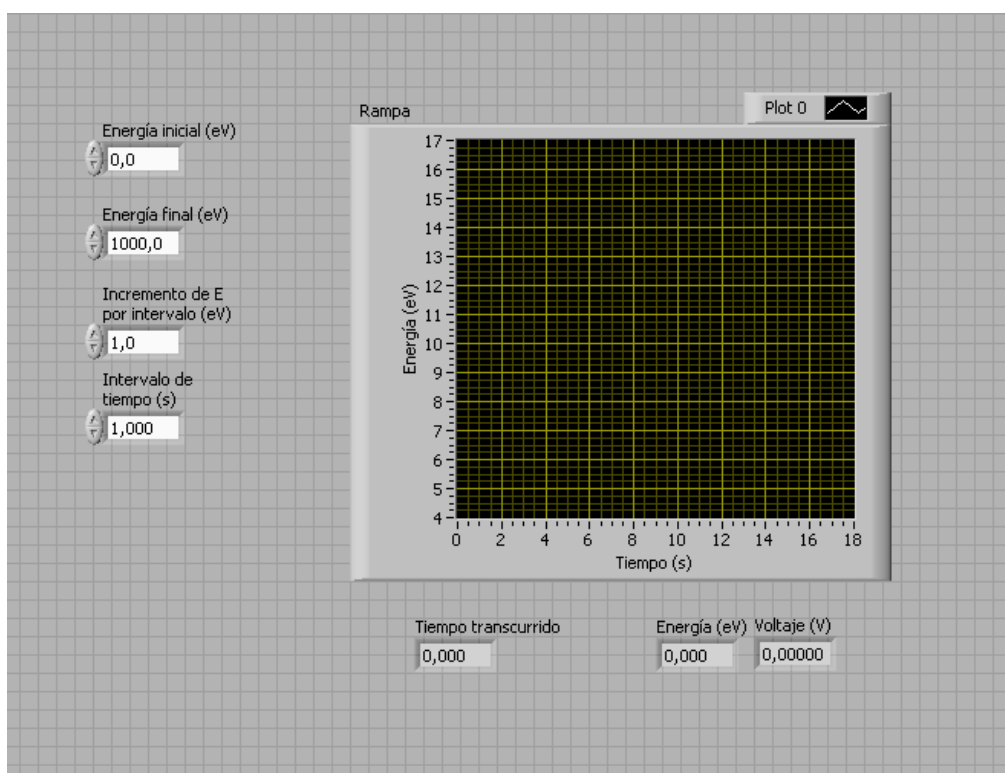


Figura 4.1. Ejemplo de panel frontal en LabVIEW®

b) Diagrama de bloques

El *diagrama de bloques* constituye el código fuente del VI (Figura 4.2). En el *diagrama de bloques* es donde se realiza la implementación del programa del VI para controlar o realizar cualquier procesamiento de las entradas y salidas que se crearon en el *panel frontal*. El *diagrama de bloques* incluye *funciones* y *estructuras* integradas en las librerías que incorpora LabVIEW®. Las *funciones* y las *estructuras* son nodos elementales, son análogas a los operadores o librerías de funciones de los lenguajes convencionales.

Los *controles* e *indicadores* que se colocaron previamente en el panel frontal, se materializan en el diagrama de bloques mediante los *terminales*.

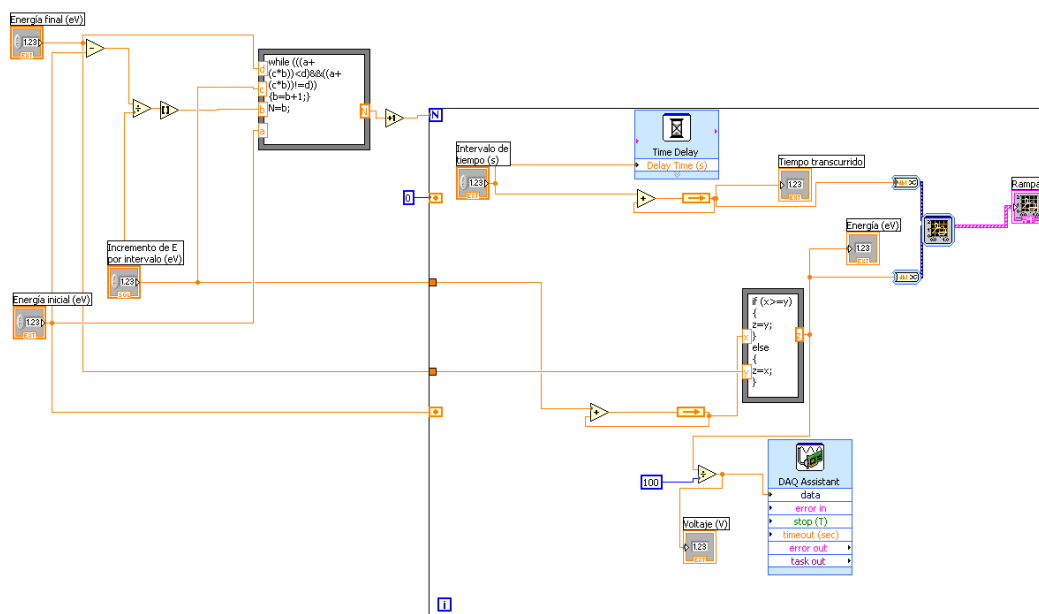


Figura 4.2. Ejemplo de Diagrama de Bloques en LabVIEW®

El *diagrama de bloques* se construye conectando los distintos objetos (funciones, estructuras, etc.) entre sí, como si de un circuito se tratara. Los cables unen terminales de entrada y salida con los objetos correspondientes, y por ellos fluyen los datos.

LabVIEW® posee una extensa biblioteca de *funciones*, entre ellas, aritméticas, comparaciones, conversiones, funciones de entrada/salida, de análisis, entre otras.

Las *estructuras*, similares a las declaraciones causales y a los bucles en lenguajes convencionales, ejecutan el código que contienen de forma condicional o repetitiva (bucle *for*, *while*, *case*,...).

Los cables son las trayectorias que siguen los datos desde su origen hasta su destino, ya sea una función, una estructura, un terminal, etc. Cada cable tiene un color o un estilo diferente, lo que diferencia unos tipos de datos de otros.

4.2. Descripción del Panel Frontal.

En este apartado se detallará la aplicación de software desarrollada en LabVIEW® que controla el cañón de electrones y la adquisición de datos. En primer lugar se describirá el panel frontal y la función de cada uno de los elementos. Seguidamente se pasará a explicar el diagrama funcional de la aplicación y su modo de funcionamiento.

Las medidas experimentales deben realizarse para tres casos diferentes en función del Focus y de la Energía, de modo que se optó por crear una aplicación específica para cada caso a las que se accede a través de un menú principal.

4.2.1. Menú Principal.

Al ejecutarse el programa se abre un Menú Principal (Figura 4.3) a través del cual podemos acceder a cualquiera de las tres aplicaciones desarrolladas, que son:

- Barrido de Energía con *Spot* mínimo.
- Barrido de Energía con Focus constante.
- Barrido de la tensión del Focus con Energía constante.



Figura 4.3. Menú de selección

Una vez seleccionada la aplicación que queremos utilizar, se abre una nueva ventana con el panel frontal de la aplicación escogida, donde podremos introducir los parámetros necesarios para realizar el barrido.

4.2.2. Barrido de Energía con *Spot* mínimo.

Esta aplicación nos permite realizar un barrido de Energía entre dos valores que seleccionemos en el panel frontal, pudiendo decidir si queremos que la tensión del Focus se ajuste a una recta o a una parábola para obtener el tamaño mínimo del *spot*.

4.2.2.1. Panel Frontal.

El panel frontal (Figura 4.4) es la pantalla que visualiza el usuario cuando ejecuta la aplicación. A través de esta interfaz el usuario puede seleccionar los parámetros necesarios que determinan las características del barrido que se quiere realizar.

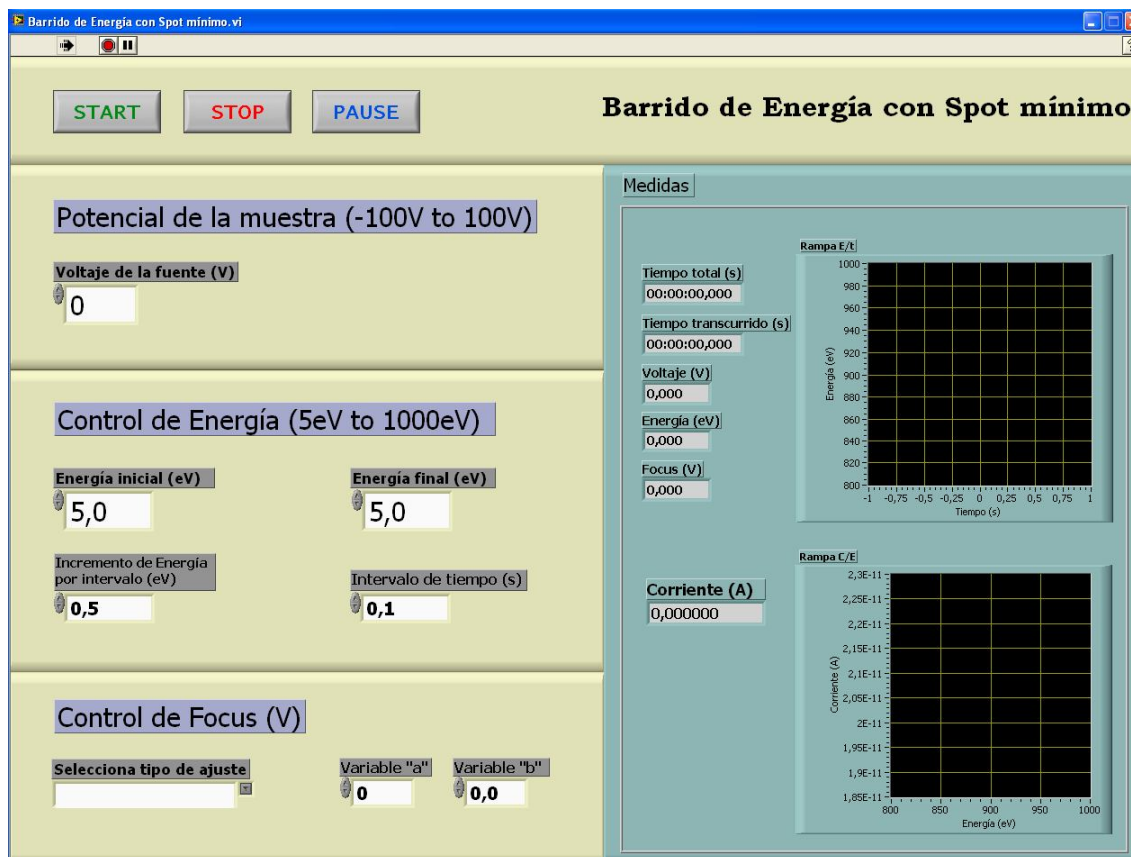


Figura 4.4. Panel frontal del programa Barrido de Energía con Spot mínimo.

Se ha dividido el panel frontal en dos partes. En la parte izquierda es donde el usuario interactúa con el programa y fija los rangos de medida y las condiciones en las que debe hacerse, y en la parte derecha se muestran los resultados obtenidos.

4.2.2.1.1. Botones de control de la aplicación.

Son elementos comunes a las tres aplicaciones creadas:

- **START.** Al pulsar este botón (Figura 4.5) da comienzo el barrido con los ajustes que hemos seleccionado.



Figura 4.5. Control START

- **STOP.** Cuando presionamos este botón (Figura 4.6) el programa deja de ejecutarse y se reinician todas las variables.



Figura 4.6. Control STOP

- **PAUSE.** Presionando este botón (Figura 4.7) el programa queda en suspenso. Para que el programa siga ejecutándose a partir del punto en el que se pausó es necesario volver a presionar el botón de Pause.



Figura 4.7. Control PAUSE

4.2.2.2.2. Controles de medida.

Son los elementos del panel frontal que nos permiten fijar los parámetros que definen cómo se hará el barrido en Energía y focalización del haz de electrones.

- **Voltaje de la fuente** (Figura 4.8).

Parámetro común en las tres aplicaciones. Es el potencial al que estará la muestra respecto a la tierra de la campana. Viene dado en Voltios (V). Podemos introducir valores entre -100 y 100 V.

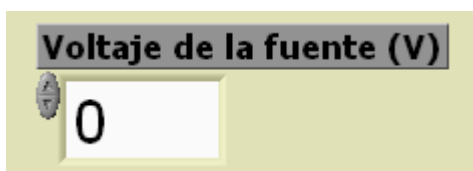


Figura 4.8. Control de Voltaje de la Fuente

- **Energía inicial** (Figura 4.9).

Fija el valor de Energía a la que comenzará el barrido. Viene dado en eV. Admite valores entre 5 y 1000 eV.

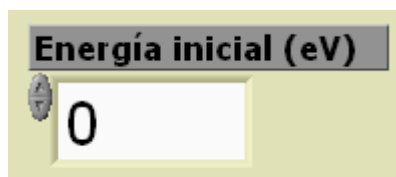


Figura 4.9. Control de Energía inicial

- **Energía final** (Figura 4.10).

Fija el valor de Energía al que terminará el barrido. Viene dado en eV. Acepta valores entre 5 y 1000 eV.

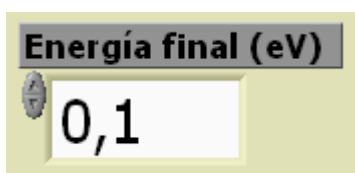


Figura 4.10. Control de Energía final

- **Incremento de Energía por intervalo** (Figura 4.11).

Es el paso al que se realiza el barrido entre el valor máximo y mínimo de Energía. Viene dado en eV. El valor mínimo que acepta es de 0.5 eV (el mínimo salto en Energía que permite la tarjeta de adquisición de datos), y el máximo es de 995 eV.

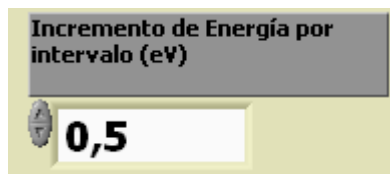


Figura 4.11. Control del Incremento de Energía por intervalo

- **Intervalo de tiempo** (Figura 4.12).

Indica el tiempo que queremos que transcurra entre un incremento y otro durante el barrido en energía. Viene dado en segundos. Admite valores entre 0,1 y 1000 segundos.

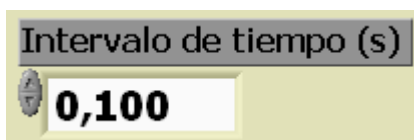


Figura 4.12. Control del Intervalo de tiempo

- **Selecciona tipo de ajuste** (Figura 4.13).

Permite seleccionar el modo en que debe ajustarse la tensión del Focus para obtener el tamaño mínimo de *spot*. Podemos elegir entre dos tipos de ajuste:

- Recta $F = a + bE$.
- Parábola.

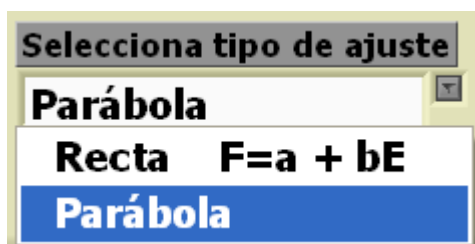


Figura 4.13. Selección del tipo de ajuste

- **Variables “a” y “b”** (Figura 4.14).

Son los valores que definen la recta a la que se ajustará la tensión del Focus en la ecuación $F = a + bE$ cuando se selecciona esta opción en el menú descrito en la Figura 4.13. La variable “a” admite valores entre 0 y 1000, mientras que la variable “b” permite valores entre 0 y 1.

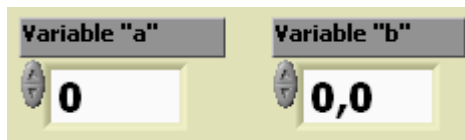


Figura 4.14. Control de las variables “a” y “b”

En caso de haber seleccionado ajustar la tensión del Focus con la parábola no es necesario introducir ningún valor en las variables “a” o “b”, ya que la ecuación de la parábola se ha obtenido de la gráfica que se mostró en el capítulo 2 (Figura 2.18) y que muestra el diámetro mínimo del *spot* en función de la Energía y el Focus.

La ecuación de la parábola se muestra al final de la sección 4.3.3.3 de este mismo capítulo.

4.2.2.2.3. Indicadores de medida.

Son los elementos ubicados en el lado derecho del panel frontal donde se visualizan los resultados obtenidos en la medida en las gráficas de Energía-tiempo E/t y Corriente-Energía C/E, además de los parámetros que sirven para visualizar en cualquier instante las condiciones en las que se están realizando las medidas, como son el tiempo total de adquisición, el tiempo transcurrido, el Voltaje, la Energía, tensión del Focus y la Intensidad. Se detallan a continuación:

- **Tiempo total** (Figura 4.15). Muestra el tiempo total que tardará en realizarse el barrido y viene dado en horas, minutos y segundos.

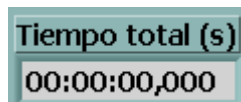


Figura 4.15. Indicador de tiempo total

- **Tiempo transcurrido** (Figura 4.16). Indica el tiempo que ha transcurrido desde que se inició el barrido. Viene dado en horas, minutos y segundos.



Figura 4.16. Indicador de tiempo transcurrido

- **Voltaje** (Figura 4.17). En este indicador podemos ver el voltaje que la tarjeta de adquisición de datos pone en la salida analógica que hemos asignado a la Energía. El rango de variación es de 0 a 10 V.

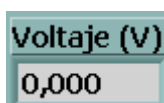


Figura 4.17. Indicador de Voltaje

- **Energía** (Figura 4.18). Nos muestra el valor de Energía del haz de electrones incidente a la que se hizo la última medida de corriente en muestra.

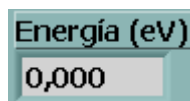


Figura 4.18. Indicador de Energía

- **Focus** (Figura 4.19). Indica el voltaje asignado al Focus en la última medida de corriente para obtener el mínimo tamaño de *spot*.

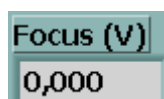


Figura 4.19. Indicador de Focus

- **Corriente** (Figura 4.20). Muestra el valor de la última medida de corriente, dada en Amperios.

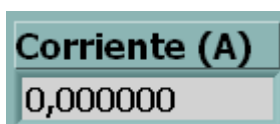


Figura 4.20. Indicador de Corriente

- **Rampa E/t y Rampa C/E** (Figura 4.21). Representación gráfica de la Energía del haz de electrones (eV) en función del tiempo (s) y de la Corriente medida en la muestra (A) en función de la energía (eV), respectivamente. Esto permite visualizar en cada instante de tiempo cómo varían estos parámetros durante todo el proceso de medida y en consecuencia tomar decisiones.

Al empezar el barrido el programa da la opción al usuario de salvar los resultados obtenidos en un archivo .txt que puede renombrarse como se desee.

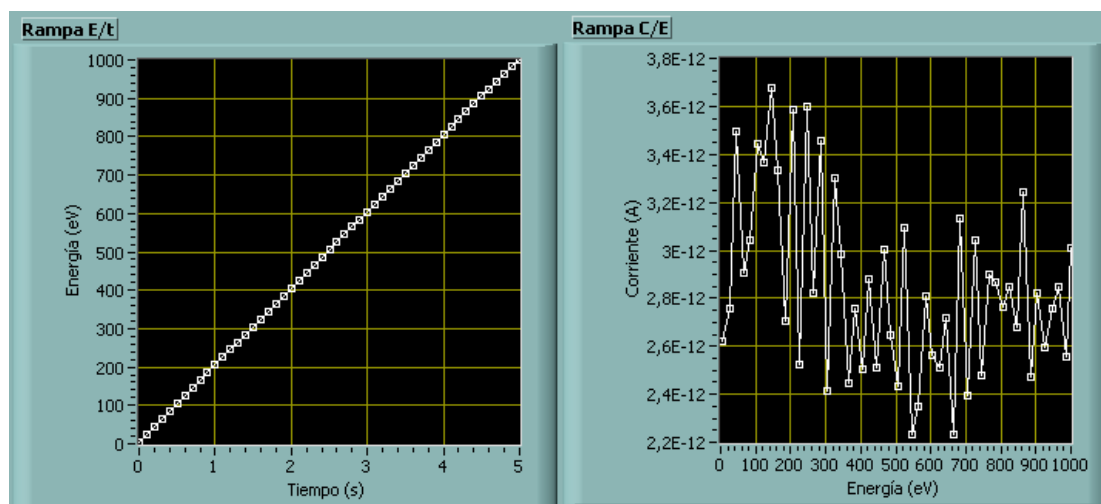


Figura 4.21. Representación gráfica de E/t y C/E

4.2.3. Barrido de Energía con Focus constante.

Esta aplicación nos permite realizar un barrido en Energía dentro del rango establecido, manteniendo la tensión del Focus constante en el valor prefijado.

4.2.3.1. Panel Frontal.

En este caso el panel frontal (Figura 4.22) es básicamente el mismo que para la aplicación anterior, únicamente cambia el control del Focus, ya que ahora ajustamos el Focus con un valor de tensión que permanece constante durante todo el barrido, mientras que en la aplicación anterior podíamos ajustar la tensión del Focus con una recta o una parábola.

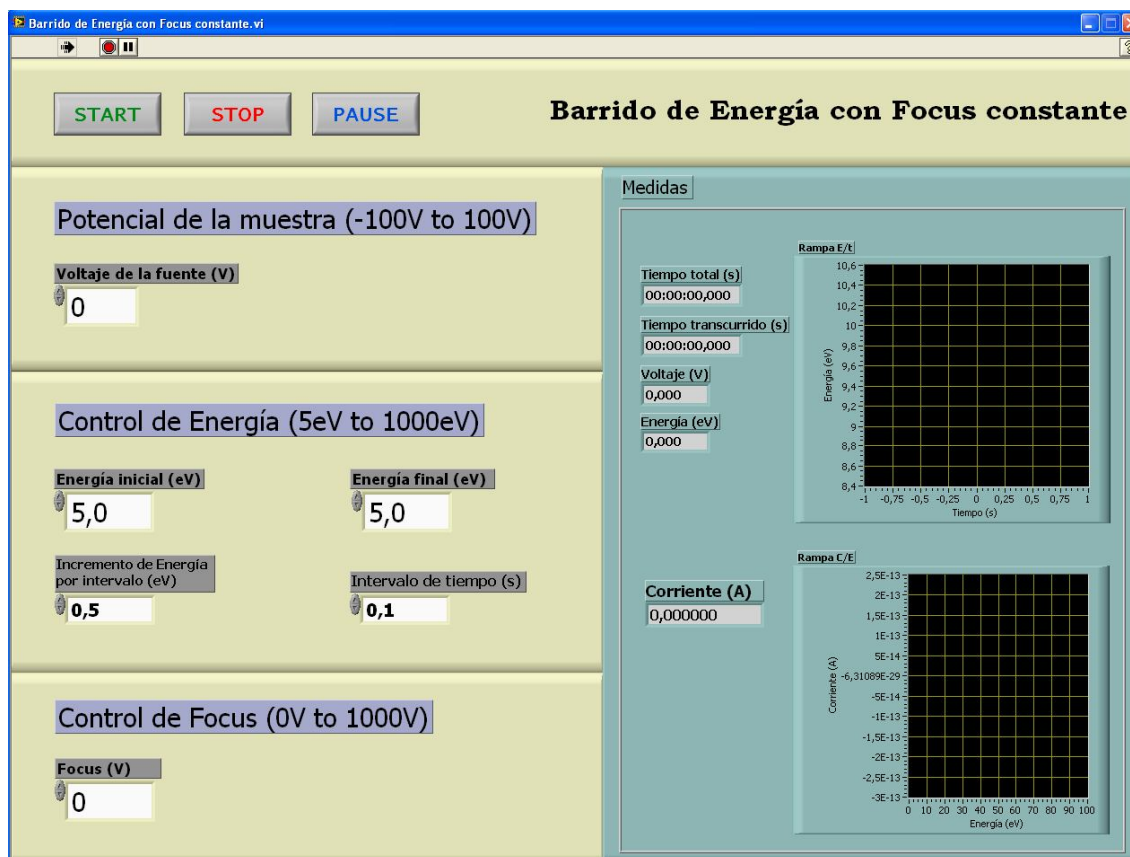


Figura 4.22. Panel frontal del programa Barrido de Energía con Focus constante

4.2.3.2. Controles de medida.

A continuación se describe el control del panel frontal que nos permite fijar el valor constante del Focus:

- **Focus** (Figura 4.23). Fija el voltaje constante del Focus al que se realizará el barrido de Energía. Viene dado en voltios y acepta valores entre 0 y 1000 V.

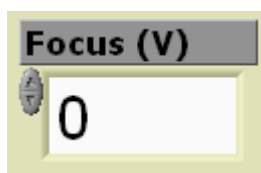


Figura 4.23. Control del Focus

4.2.4. Barrido de la tensión del Focus con Energía constante.

Esta aplicación nos permite variar el voltaje del Focus linealmente entre dos valores, manteniendo la Energía del haz de electrones constante durante toda la medida a un valor también fijado de antemano. Es muy útil para conocer cómo varía el tamaño y la intensidad del haz en función de la tensión del Focus para cada energía.

4.2.4.1. Panel Frontal.

A diferencia de las aplicaciones anteriores, en este caso tenemos en el panel frontal (Figura 4.24) dos botones de control distintos ya que ahora fijamos un valor de voltaje de Focus inicial y otro de Focus final, además del valor de Energía constante del haz de electrones al que se realizará el barrido.

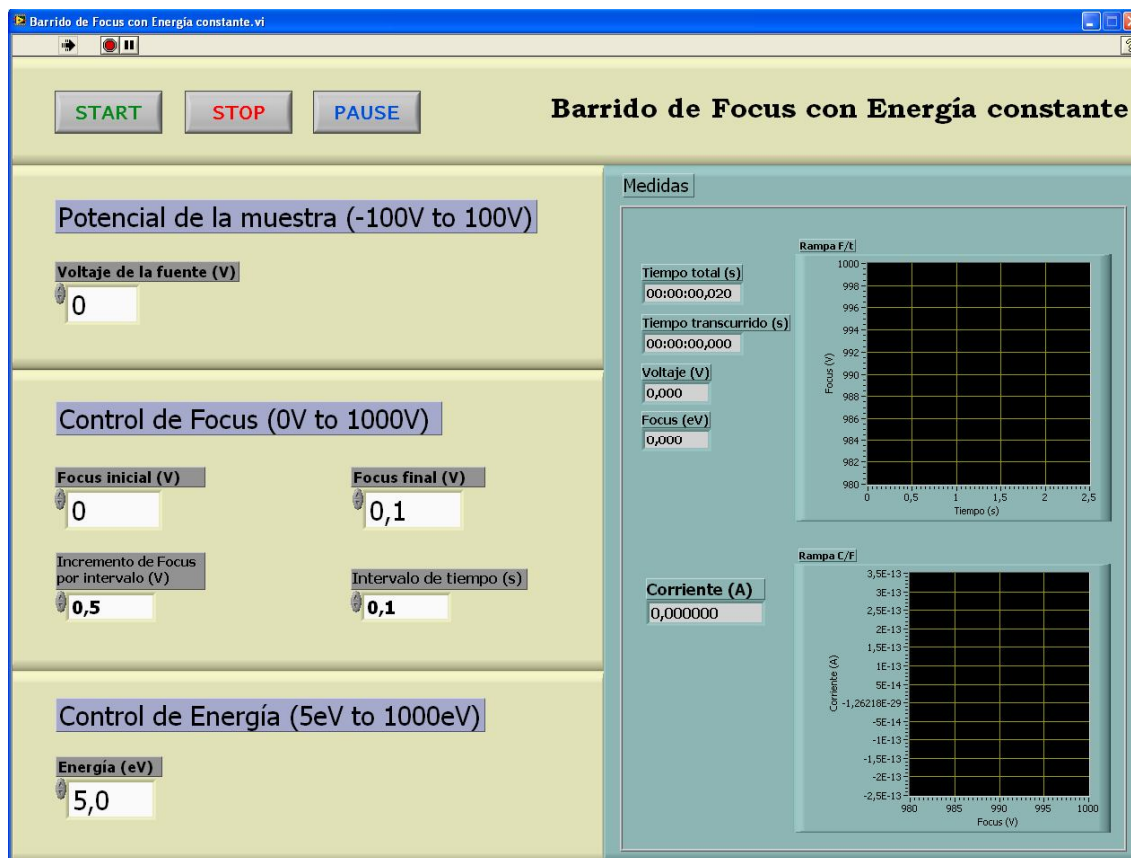


Figura 4.24. Panel frontal del programa Barrido de la tensión del Focus con Energía constante

4.2.4.2. Controles de medida.

A continuación se describen los controles del panel frontal que nos permiten fijar los parámetros que definen cómo se hará el barrido de la tensión del Focus y fijar el valor constante de la Energía:

- **Focus inicial** (Figura 4.25). Fija el voltaje de Focus con el que comenzará el barrido de la muestra. Viene dado en voltios. Acepta valores entre 0 y 1000V.

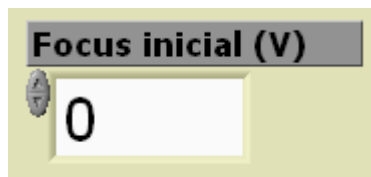


Figura 4.25. Control de Focus inicial

- **Focus final** (Figura 4.26). Fija el valor del voltaje de Focus con el que terminará el barrido. Viene dado en voltios. Admite valores entre 0 y 1000V.

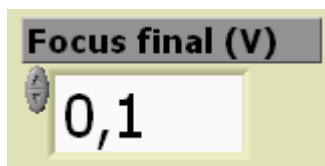


Figura 4.26. Control de Focus final

- **Energía** (Figura 4.27). Fija el valor constante de Energía a la que se realizará el barrido. Viene dado en eV y acepta valores entre 5 y 1000 eV.



Figura 4.27. Control de Energía

4.3. Descripción del Diagrama de Bloques.

En este apartado se describe cómo está estructurado el programa y se comentan los aspectos más importantes del código utilizado. Se ha decidido explicar las diferentes etapas de manera general, indicando la función que realizan, sin entrar en una descripción minuciosa ya que en ese caso sería necesario detenerse en la programación en lenguaje G de LabVIEW®. El listado completo del código se muestra en el Anexo. Para facilitar la comprensión se recomienda leer la descripción que sigue apoyándonos en dicho listado.

El programa está estructurado en bloques denominados instrumentos virtuales (VIs). El programa principal o VI, *menuprincipal.vi*, llama a otros subprogramas o subVIs que realizan funciones específicas. Para dejar clara la estructura de la aplicación primeramente se va a presentar la jerarquía de VIs.

4.3.1. Jerarquía de la aplicación.

En la Figura 4.28 se muestra la jerarquía de la aplicación Menú Principal. Sólo se ha representado el primer nivel, es decir, sólo se muestran los subVIs llamados por el VI principal *menuprincipal.vi*. Los subVIs en este primer nivel son los siguientes:

- Barrido_de_Energy_con_Focus_cte3.vi
- Barrido_Focus_con_Energy_cte3.vi
- Barrido_Focus_y_Energy3.vi

En el Anexo, junto con el listado de código, se puede ver la jerarquía completa de la aplicación.

A continuación se describe el diagrama de bloques de *menuprincipal.vi* y de cada uno de los subprogramas.

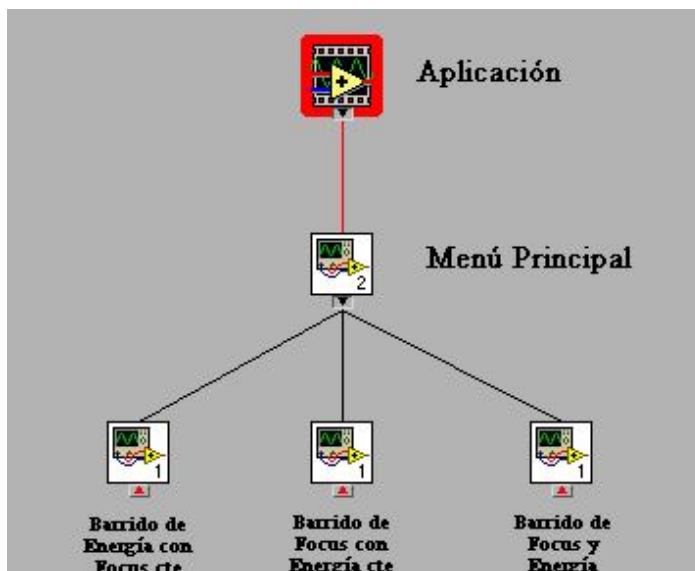


Figura 4.28. Jerarquía de la aplicación

4.3.2. Menuprincipal.vi.

El Menuprincipal.vi es el programa que se abre al ejecutar la aplicación. Consiste en una sencilla estructura (Figura 4.29) que nos permite llamar a uno de los tres subprogramas elegido en el Menú Principal, y que pueden ser:

- Barrido de Energía con Focus constante.
- Barrido de Focus con Energía constante.
- Barrido de Energía con *Spot* mínimo.

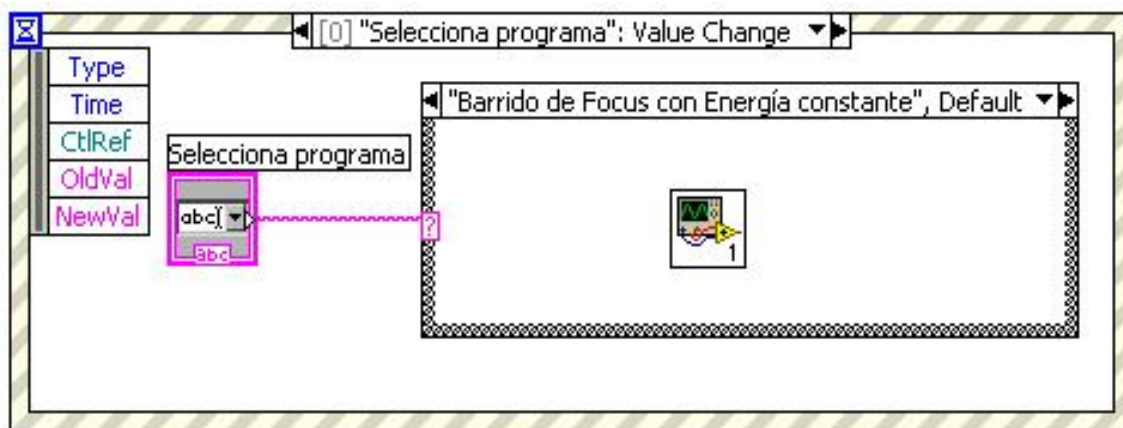


Figura 4.29. Selección de subprograma en el Menú Principal

4.3.3. Barrido de Energía con *Spot* mínimo.vi.

El Barrido de Energía con *Spot* mínimo.vi es el subprograma más complicado de los tres ya que mientras se realiza el barrido en Energía, simultáneamente la tensión del Focus se ajusta para obtener el valor de *spot* mínimo.

Se hará la descripción del diagrama de bloques en el mismo orden en el que el programa se va ejecutando.

4.3.3.1. Condiciones previas al barrido.

A continuación se detallan los pasos que realiza el programa desde el momento en el que se ejecuta la aplicación y se introducen los parámetros hasta que se pulsa el botón START y empieza el barrido.

- **Inicialización de los controles START, STOP y PAUSE.** Se emplea una función booleana para asignar el valor “false” a los controles del panel frontal STOP, PAUSE y START (Figura 4.30), con la intención de que en ningún caso se arrastre el valor “true” de un barrido anterior y se produzcan errores en el funcionamiento.



Figura 4.30. Inicialización de los controles START, STOP y PAUSE

- **Control de los indicadores del Panel Frontal.** La estructura que se describe a continuación en la Figura 4.31 nos permite actualizar los indicadores del panel frontal de dos maneras:

- En primer lugar compara el valor introducido de Energía inicial con el de Energía final, y en el caso de que la inicial sea mayor, automáticamente iguala la Energía final a la inicial para que en ningún caso se haga el barrido en el sentido decreciente.

- En segundo lugar toma los datos introducidos en los controles de Intervalo de tiempo, Incremento de Energía por intervalo, Energía final y Energía inicial para calcular de forma sencilla el tiempo que tardará en realizarse el barrido. Este dato se va actualizando de forma automática en el indicador “Tiempo total” del panel frontal a medida que se modifican los parámetros introducidos en los controles.

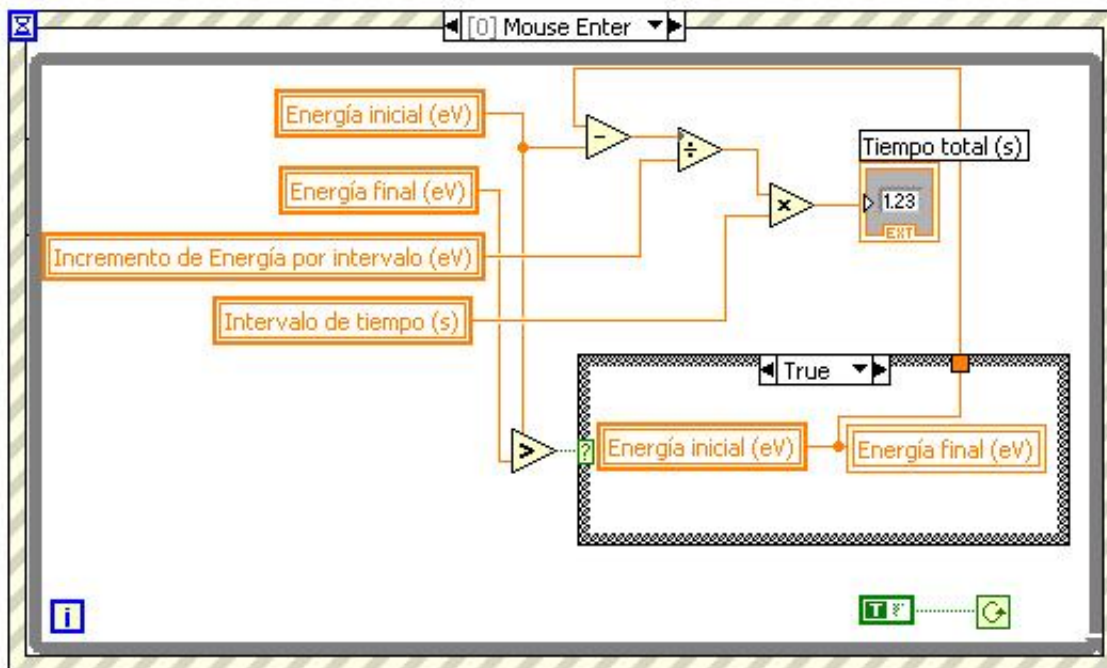


Figura 4.31. Control de los indicadores del panel frontal

- **Detención obligada de la aplicación en caso de cerrar el Panel Frontal.** Se trata de una sencilla estructura (Figura 4.32) que detiene la ejecución del programa en el caso de que el usuario cierre el panel frontal. Con esto conseguimos que la aplicación no se quede atrapada en un bucle y sea sencillo volver a iniciar el programa.

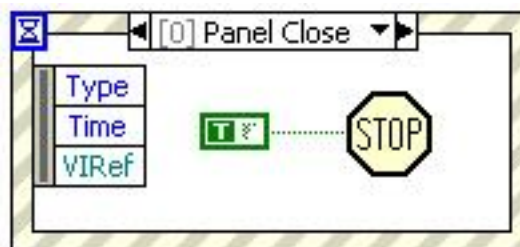


Figura 4.32. Detención de la aplicación en caso de cerrar el Panel Frontal

4.3.3.2. Secuencia de barrido.

En este apartado se describen las etapas que sigue el programa para realizar el barrido a partir del momento en el que el usuario pulsa el botón START del panel frontal.

Una vez pulsado el botón START se activa la estructura *Event* que a su vez contiene una estructura *Stacked Sequence*, la cual nos permite que el programa siga la secuencia necesaria para ejecutar el barrido. En una primera etapa se inicializan los instrumentos.

- **Etapas 1. Inicialización de instrumentos** (Figura 4.33). En el primer paso, el programa lee el valor de Potencial para polarizar la muestra que el usuario introdujo en el panel frontal y lo asigna a la fuente de tensión del picoamperímetro utilizando el

subVI *Instrument1.vi*. A su vez el subVI *DAQ3.vi* pone a cero el valor de voltaje del Focus y de la Energía en la fuente Kimball.



Figura 4.33. Etapa 1. Inicialización de instrumentos

- **Etapa 2. Primer tiempo de espera** (Figura 4.34). Se trata de una pausa de medio segundo para dar tiempo a que la fuente de tensión del picoamperímetro que polariza la muestra y la fuente de alimentación del cañón de electrones estabilicen los valores fijados.



Figura 4.34. Etapa 2. Primer tiempo de espera

- **Etapa 3. Barrido de Energía y ajuste del Spot** (Figura 4.35). Primeramente el programa calcula el número de iteraciones necesarias para realizar el barrido de Energía y ese valor es el que toma la estructura *For Loop*. A continuación se explica el proceso que se sigue dentro de la estructura *For Loop*:

- **Proceso en la estructura For Loop.** En la estructura *For Loop*, en un primer paso, se calculan los valores de voltaje correspondientes a la Energía y al Focus que se suministrarán por la salida analógica de la DAQ a la fuente Kimball. Son procesos paralelos y se explican a continuación:

- **Focus.** El subprograma *formulaRyP.vi* lee el tipo de ajuste seleccionado en el panel frontal junto a los valores de las variables “a” y “b” (si hemos seleccionado ajustar la tensión del Focus a una recta) y el valor de la Energía. Con estos datos calcula el valor de tensión del Focus que deberá aplicarse para obtener el *spot* mínimo. Una vez calculada la tensión del Focus, se divide entre 100 y este nuevo valor será el voltaje que se fija en la salida analógica de la DAQ. El subprograma *formulaRyP.vi* se explica con detalle más adelante.

- **Energía.** Una vez dentro de la estructura *For Loop* el Incremento de Energía se suma a la Energía inicial, el resultado obtenido es la Energía que debe tener en esa iteración el haz de electrones. Este resultado toma tres caminos simultáneos que se explican a continuación:

- Se comprueba que la Energía es inferior a 1000 eV, y si cumple esa condición, el valor de Energía lo toma la función Build XY Graph para dibujar las gráficas E/t y C/E.
- El valor de Energía se divide entre 100 para obtener el valor de voltaje que la tarjeta DAQ suministrará a la fuente Kimball. Antes, en la estructura *Formula Node*, se comprueba que este valor es menor que 10 V, ya que la fuente no permite voltajes superiores a 10 V en sus terminales traseros.



4. SOFTWARE PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL SISTEMA LABVIEW®

- El valor de Energía se envía al subprograma *formulaRyP.vi* donde se calcula el valor de la tensión del Focus que nos permite obtener un *spot* mínimo.

Simultáneamente a los dos procesos anteriores, el Intervalo de tiempo se actualiza en un sumatorio para calcular el tiempo transcurrido y el dato obtenido lo toma la función *Build XY Graph* para dibujar la gráfica E/t que se muestra en el panel frontal.

Una vez finalizada la primera iteración, la función *Write To Measurement File* toma los valores de tiempo transcurrido, Energía y Corriente y abre una ventana donde el usuario tiene la opción de guardar esos datos y los de las sucesivas iteraciones por columnas en un archivo .txt.

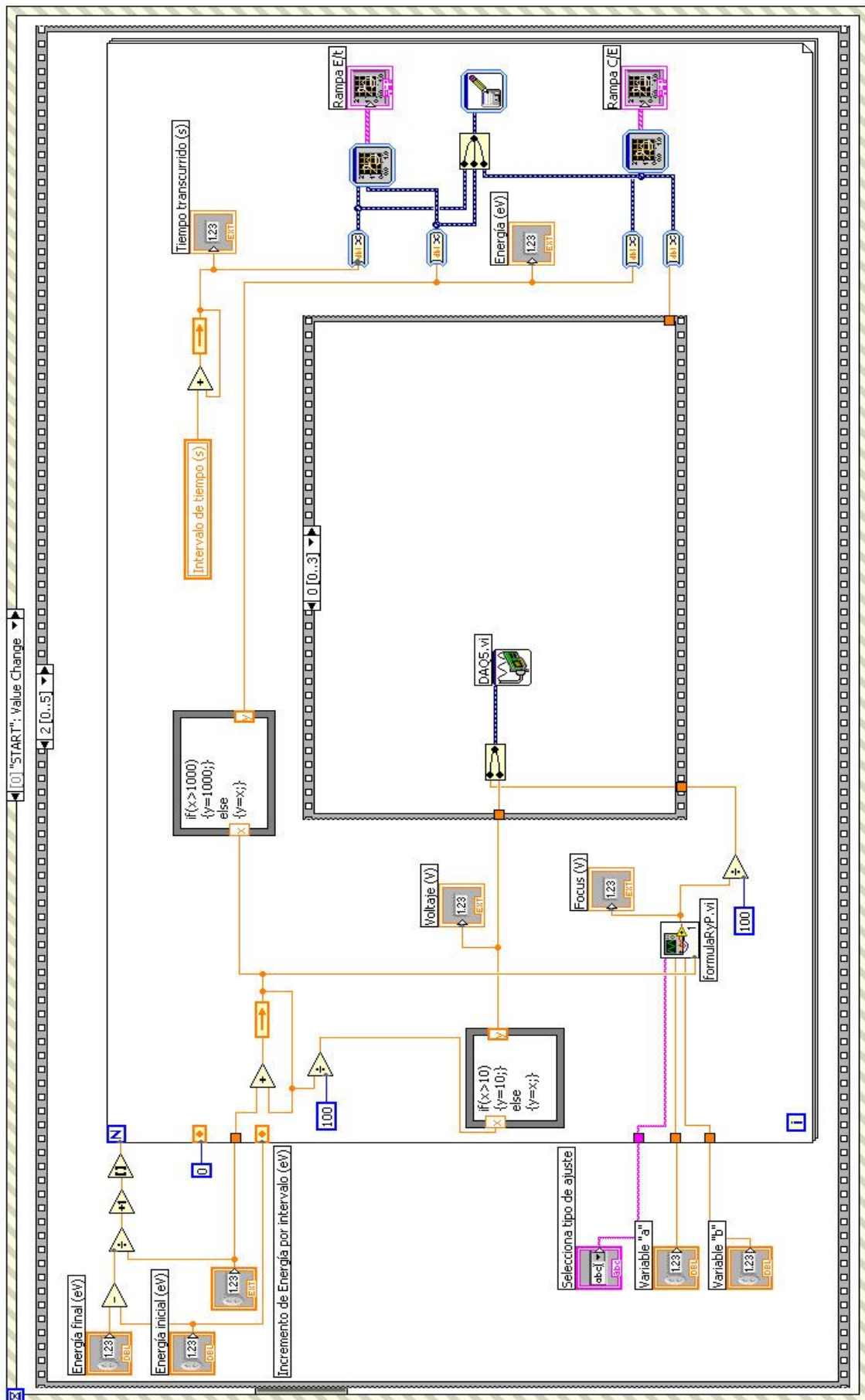


Figura 4.35. Etapa 3. Barrido de Energía y ajuste del Spot

La estructura *Stacked Sequence* dentro del *For Loop* es la que nos permite realizar el barrido propiamente dicho. Esta secuencia se repite tantas veces como iteraciones se calcularon al principio de la Etapa 3. A continuación explicamos detalladamente los pasos que se realizan en esta secuencia:

- **Paso A** (Figura 4.36). El subprograma *DAQ5.vi* toma los valores en voltios del Focus y de la Energía y se los asigna a las salidas correspondientes en la DAQ.

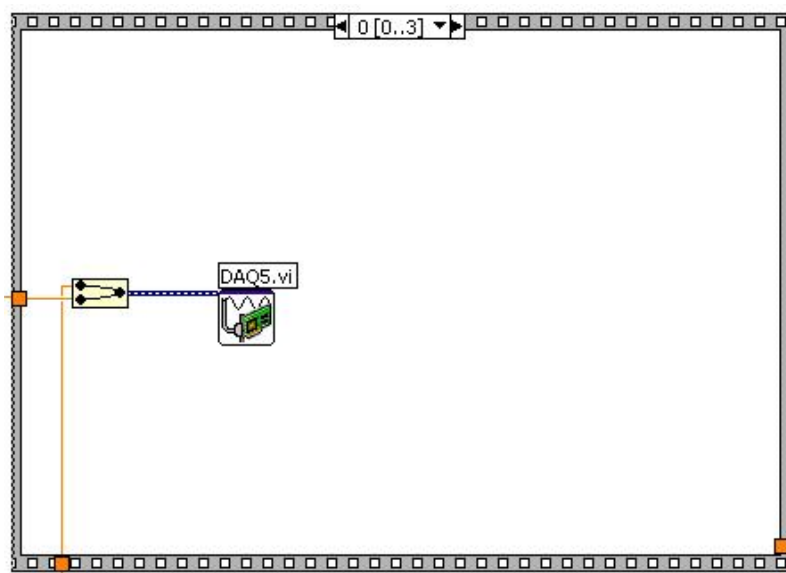


Figura 4.36. Paso A

- **Paso B** (Figura 4.37). En este paso el programa toma el valor de Intervalo de tiempo que el usuario introdujo en el panel frontal y hace una pausa teniendo en cuenta ese valor.

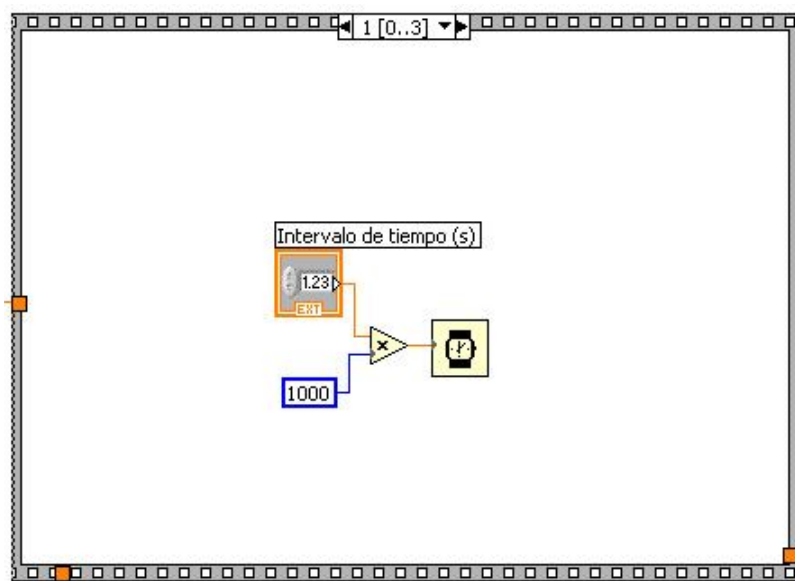


Figura 4.37. Paso B

- **Paso C** (Figura 4.38). El subprograma *Instrument2.vi* lee la corriente obtenida por el picoamperímetro. Este dato se envía a la función *Build XY Graph* para dibujar la gráfica C/E. El valor de corriente también se muestra en el panel frontal a través del indicador Corriente (A).

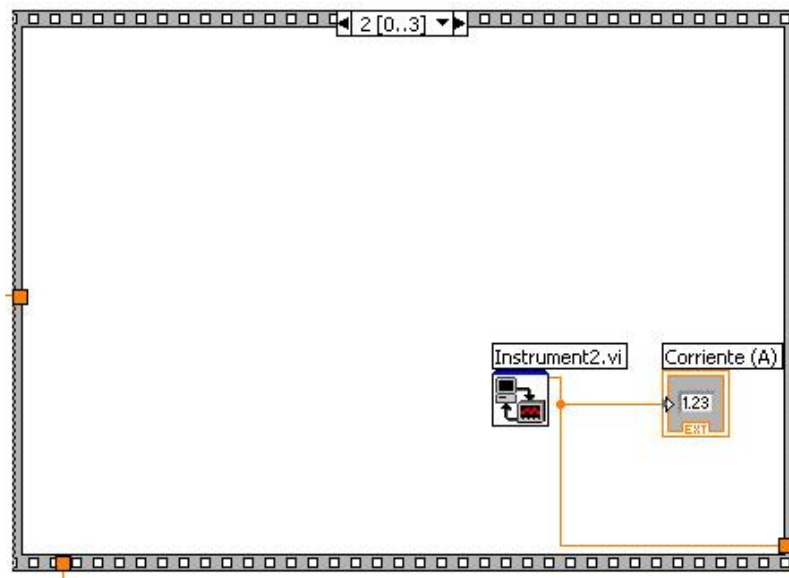


Figura 4.38. Paso C

- **Paso D.** Este último paso de la estructura *Stacked Sequence* controla los botones START y PAUSE del panel frontal.

Si el usuario presiona el botón PAUSE en el panel frontal, al llegar a este paso el programa detendrá momentáneamente su ejecución y se quedará a la espera de que el usuario vuelva a pulsar el botón PAUSE.

En caso de presionar el botón START el programa accede a una nueva estructura *Stacked Sequence* que tiene dos nuevos pasos. En el primero, Paso D1 (Figura 4.39), el subprograma *Instrument3.vi* resetea el picoamperímetro y apaga su fuente de tensión. A su vez el subprograma *DAQ3.vi* pone a cero voltios las salidas analógicas de la DAQ correspondientes a la Energía y el Focus.

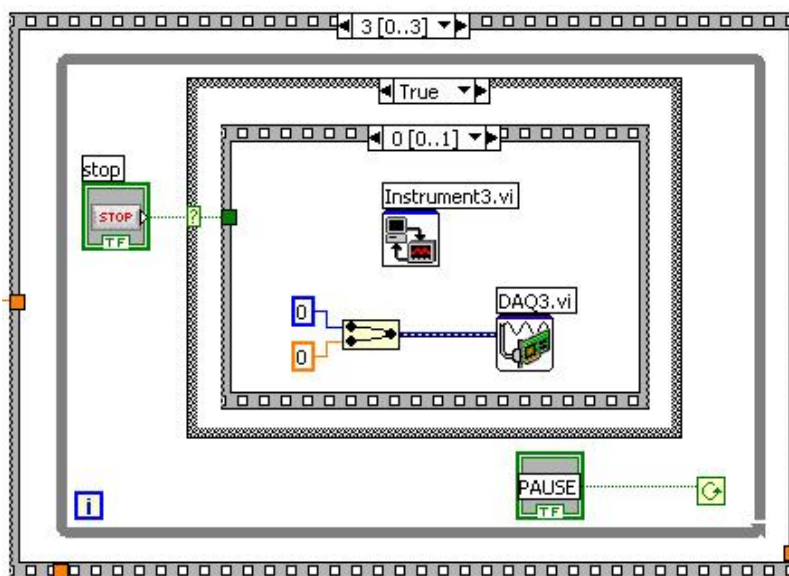


Figura 4.39. Paso D1

En el segundo paso, nombrado Paso D2 (Figura 4.40), se llama a la función STOP que detiene la ejecución del programa. Si el usuario no presiona el botón STOP del panel frontal, el programa no entrará en este último paso y continuará su ejecución normalmente. Una vez finalizadas las iteraciones de la estructura *For Loop* el programa pasa a la Etapa 4 que se explica a continuación.

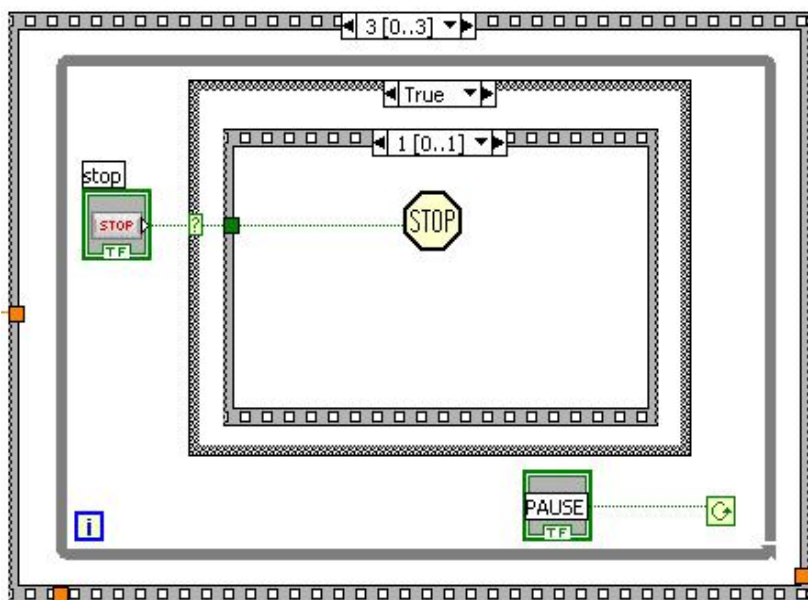


Figura 4.40. Paso D2

- **Etapa 4. Segundo tiempo de espera** (Figura 4.41). Se hace una segunda pausa de medio segundo para dar tiempo a los instrumentos a estabilizarse.



Figura 4.41. Etapa 4. Segundo tiempo de espera

- **Etapa 5. Reseteo de instrumentos** (Figura 4.42). Al igual que en el Paso D1 el subprograma *Instrument3.vi* resetea el picoamperímetro y apaga su fuente de tensión, mientras que el subprograma *DAQ3.vi* pone a cero voltios las salidas analógicas de la DAQ correspondientes a la Energía y el Focus.

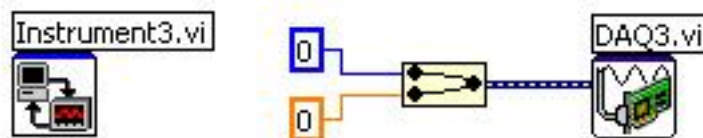


Figura 4.42. Etapa 5. Reseteo de instrumentos

- **Etapa 6. Detención del programa** (Figura 4.43). En esta última etapa, una vez finalizado el barrido y con los instrumentos reseteados, el programa llama a la función STOP y detiene la ejecución del programa.

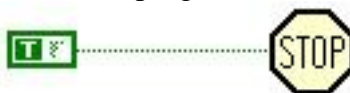


Figura 4.43. Etapa 6. Detención del programa

4.3.3.3. Subprograma formulaRyP.vi.

El subprograma *formulaRyP.vi* tiene una función muy concreta dentro del programa principal *Barrido de Energía con Spot mínimo.vi*. Su misión es calcular el valor de tensión del Focus necesario para que el *spot* del cañón de electrones tenga el mínimo tamaño.

Si el usuario ha seleccionado en el panel frontal el ajuste de la tensión del Focus con una recta, el programa leerá los valores de la variable “a”, la variable “b” y la Energía y los sustituirá en la expresión matemática correspondiente (Figura 4.44). En caso de haber seleccionado el ajuste de la tensión del Focus por la parábola, el programa toma el dato de la Energía, lo divide entre 100, y sustituye este valor en la ecuación de la parábola (Figura 4.45).

El resultado obtenido tras resolverse la ecuación será el valor de tensión del Focus que se envía a la estructura *Stacked Sequence* del interior del *For Loop* en la *Eta 3. Barrido de Energía y ajuste del Spot*, como ya se explicó anteriormente.

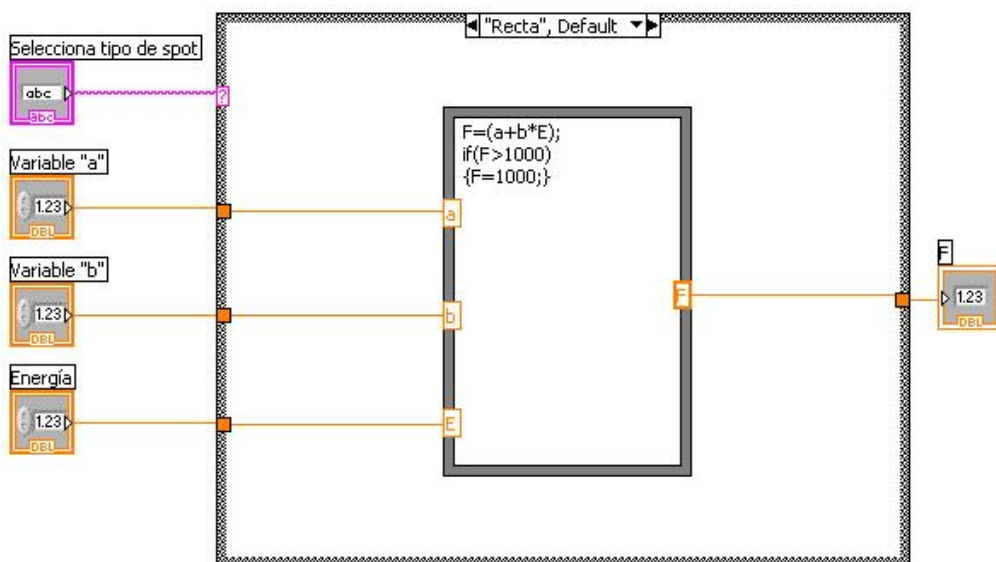


Figura 4.44. Ecuación de la Recta $F=(a+bE)$

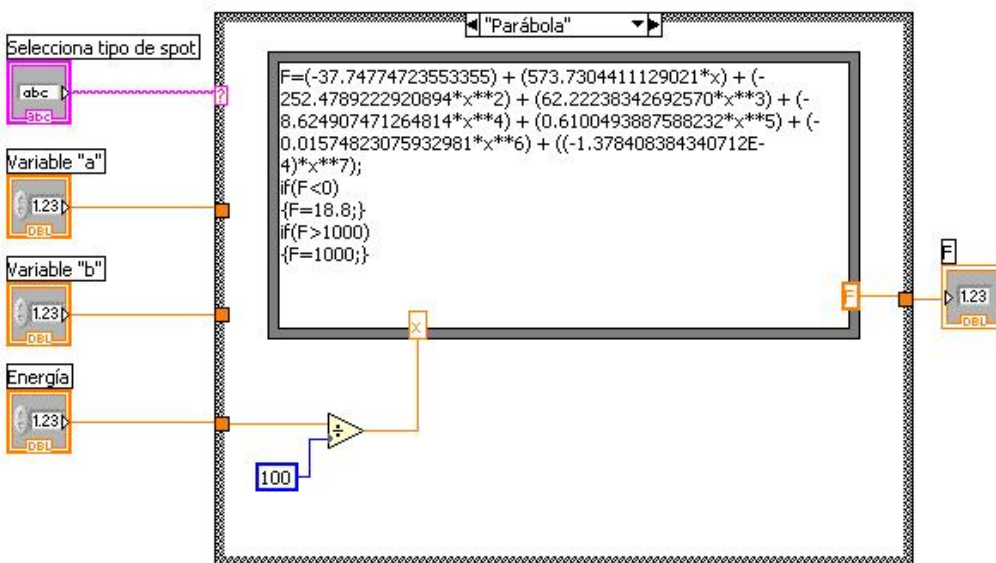


Figura 4.45. Ecuación de la Parábola

Para calcular la ecuación de la Parábola se tomaron los valores de *spot* mínimo en función de la tensión del Focus y la Energía que ya se mostraron anteriormente en el capítulo 2 (Figura 2.28) y se introdujeron en el programa OriginPro 7.5, el cual nos proporcionó la ecuación tras realizar los ajustes correspondientes. La ecuación resultante que hemos utilizado en nuestro programa es la siguiente:

$$F = (-37.74774723553355) + (573.7304411129021 * x) + (-252.4789222920894 * x^2) + (62.22238342692570 * x^3) + (-8.624907471264814 * x^4) + (0.6100493887588232 * x^5) + (-0.01574823075932981 * x^6) + ((-1.378408384340712E-4) * x^7);$$

4.3.4. Barrido de Energía con Focus constante.vi.

El Barrido en Energía con la tensión del Focus constante es un programa más sencillo que el explicado anteriormente ya que en este caso el Focus tiene un valor de tensión constante durante toda la medida y no hay que ajustarlo en cada iteración.

Únicamente hay dos diferencias con el programa anterior, una en la Etapa 1 de Inicialización de instrumentos y la otra en la Etapa 3 del Barrido en energía y se describen a continuación.

- **Etapa 1. Inicialización de instrumentos** (Figura 4.46). El programa lee el valor de Potencial para polarizar la muestra que el usuario introdujo en el panel frontal y lo asigna a la fuente de tensión del picoamperímetro utilizando el subVI *Instrument1.vi*.

Simultáneamente, el valor de tensión del Focus que se introdujo en el panel frontal se divide entre 100, y este nuevo valor resultante es el voltaje que el subprograma *DAQ3.vi* fija en la salida analógica A0 de la DAQ correspondiente al Focus, y que permanecerá constante durante todo el barrido.

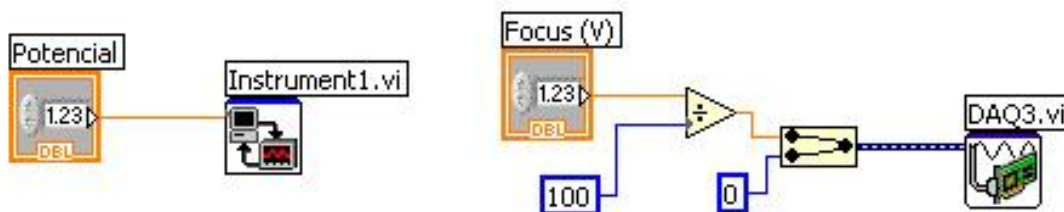


Figura 4.46. Etapa 1. Inicialización de instrumentos

- **Etapa 3. Barrido de Energía** (Figura 4.47). En esta etapa se aprecia la segunda diferencia respecto a la Etapa 3 de la aplicación *Barrido de Energía con Spot mínimo.vi* que se describió en la sección 4.3.3 de este mismo capítulo. Como en este caso la tensión del Focus permanece constante durante el barrido y su valor se fijó en la Etapa 1, el barrido sólo se hace en Energía. El subprograma *DAQ2.vi* se encarga de tomar el valor de voltaje de la Energía y asignarlo a la salida A1 de la DAQ.

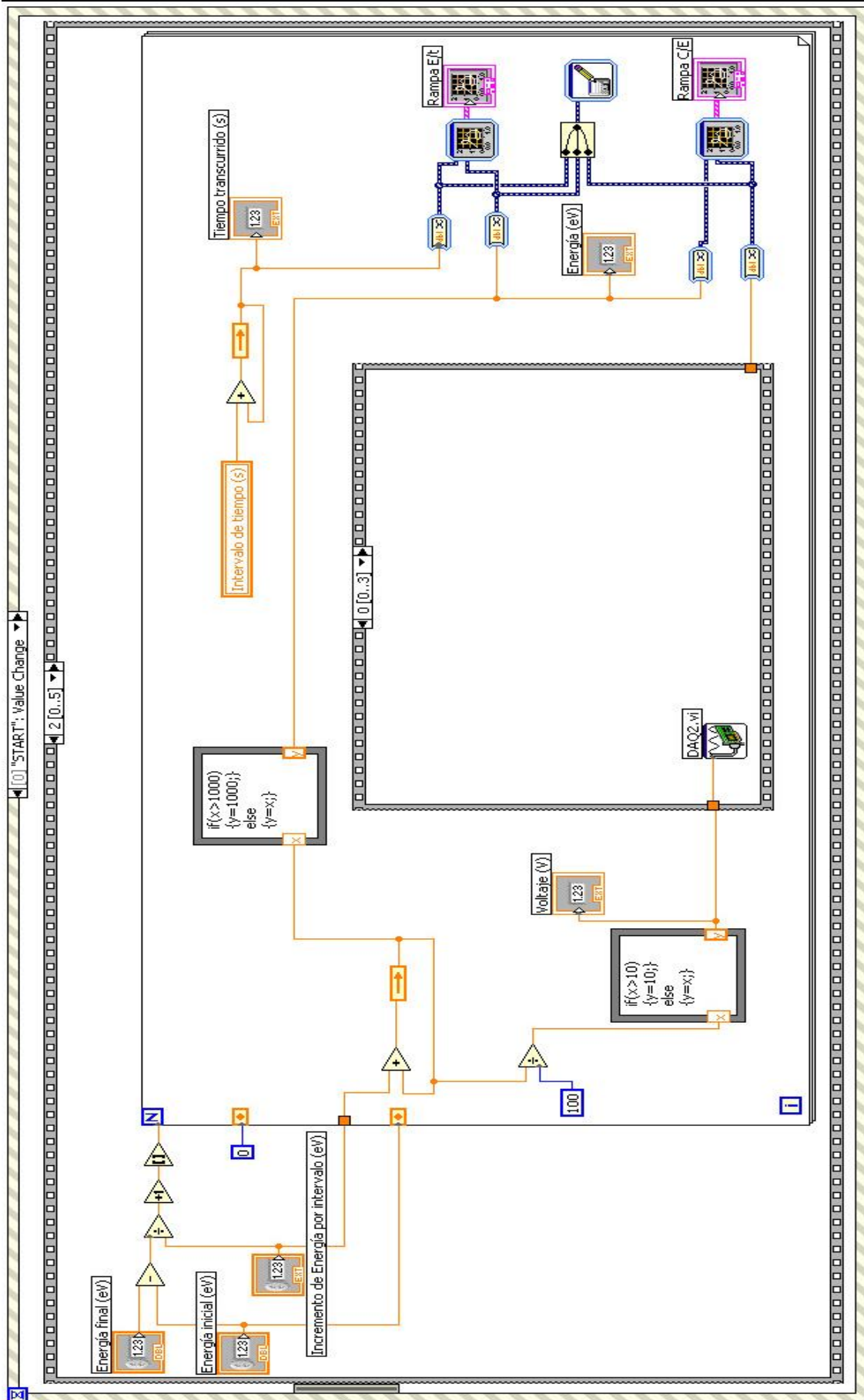


Figura 4.47. Etapa 3. Barrido de Energía

4.3.5. Barrido de la tensión del Focus con Energía constante.vi.

El tercer programa que vamos a describir es semejante al programa anterior *Barrido de Energía con Focus constante.vi*. La diferencia es que anteriormente se barría en Energía con la tensión del Focus constante y ahora el barrido es para el voltaje de Focus dejando constante la Energía del haz, pero la estructura del programa es idéntica. Los únicos cambios los vemos en las Etapa 1 y 3.

- **Etapa 1. Inicialización de instrumentos** (Figura 4.48). En este caso la Energía permanece constante durante todo el proceso. El subprograma *DAQ3.vi* asigna a la salida analógica A1 de la DAQ el voltaje de Energía, mientras que el subVI *Instrument1.vi* asigna el potencial al que se polarizará la muestra a la fuente de tensión del picoamperímetro.



Figura 4.48. Etapa 1. Inicialización de instrumentos

- **Etapa 3. Barrido de Focus** (Figura 4.49). Dentro de la estructura *For Loop*, en el Paso A de la *Stacked Sequence*, tenemos un subprograma llamado *DAQ4.vi* que toma el valor en voltaje del Focus y lo asigna a la salida A0 de la DAQ.

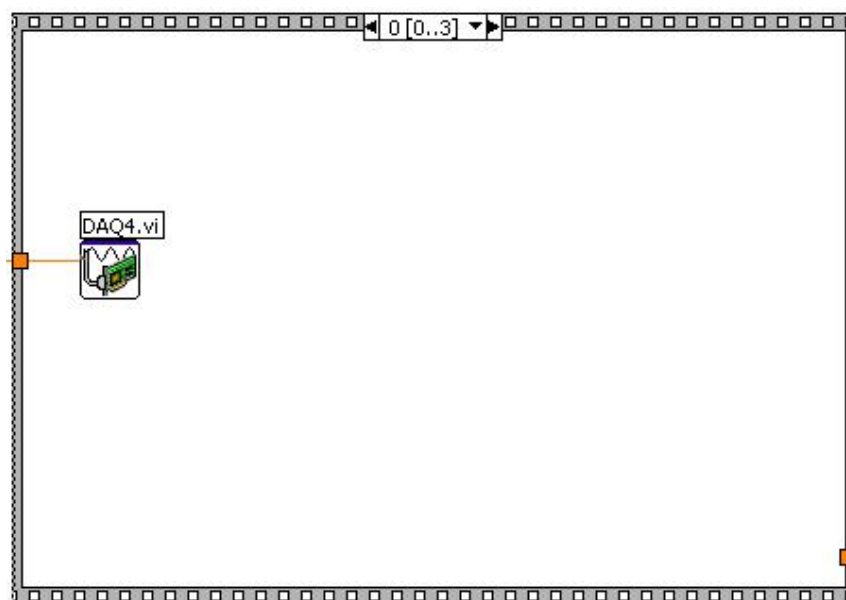


Figura 4.49. Paso A



4.3.6. Comentario sobre los subprogramas InstrumentX.vi y DAQX.vi.

Además de los subprogramas anteriormente descritos también se han utilizado otros programas para comunicar con los instrumentos. En este proyecto han sido nombrados como *InstrumentX.vi* y *DAQX.vi*.

Se trata de pequeños programas estándar proporcionados por el fabricante y en los que el programador únicamente tiene que introducir el código correspondiente para que el instrumento realice las tareas deseadas. Por este motivo no se van a describir en profundidad estos subprogramas y sólo se explicará el código utilizado.

- **DAQ.vi.** Programa para comunicar con la tarjeta DAQ. En este caso seleccionamos la salida analógica de voltaje en la configuración inicial. La tarjeta de adquisición dispone de dos salidas analógicas y asignamos la salida A0 para el Focus y la salida A1 para la Energía. El rango de la señal de salida estará comprendido entre 0 y 10 V y en la configuración de *Generation Mode* seleccionamos la opción 1 *Sample (On Demand)*.

- **Instrument.vi.** Esta aplicación nos permite comunicar con el picoamperímetro Keithley modelo 6487. A continuación se pasa a explicar en detalle las líneas de comando empleadas en los diferentes subprogramas:

1. Instrument1.vi.

*RST ; Resetea el instrumento 6487 a la configuración por defecto.
:DISP:ENAB OFF ; Desactiva el display del picoamperímetro.
SOUR:VOLT:RANG 500 ; Selecciona el rango de 500V de la fuente DC.
SOUR:VOLT X ; Asigna a la fuente el voltaje introducido por el usuario.
SOUR:VOLT:ILIM 2.5e-6; Limita la corriente a 2.5mA.
SOUR:VOLT:STAT ON ; La fuente de voltaje está operativa.

2. Instrument2.vi.

CONF:CURRE:DC ; Selecciona la función “corriente”.
READ? ; Lee el dato de corriente y lo devuelve.

3. Instrument3.vi.

SOUR:VOLT:STAT OFF ; La fuente de voltaje deja de estar operativa.
DISP:ENAB ON ; Activa el display del picoamperímetro.
*RST ; Resetea el instrumento 6487 a la configuración por defecto.



5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES.

En este capítulo se describen las medidas realizadas para comprobar el correcto funcionamiento del programa así como algunos estudios preliminares de la variación de la corriente de emisión del cañón de electrones con el potencial aplicado a la rejilla (G2) y al Focus, y su influencia en la determinación de la emisión de electrones secundarios de una muestra. La muestra utilizada es un acero al carbono corrugado, suministrado por la empresa NERVACERO S.A. a Javier Martínez Sanz³.

Las medidas realizadas se presentan en los siguientes apartados:

- Del apartado 5.1 al 5.3 se presentan los experimentos realizados para comprobar la linealidad en el tiempo de los barridos de voltaje correspondientes a la Energía y al Focus. Se muestra que estos barridos se realizan de forma lineal y, además, se comparan en modo manual y en modo automático los valores de Intensidad de corriente en función de la Energía del haz, comprobándose el correcto funcionamiento del programa.
- En los apartados 5.4, 5.5 y 5.6 se muestran las condiciones de barrido del haz en Energía para obtener un *spot* mínimo y las variaciones en la Intensidad de la corriente en muestra en función del potencial de G-2 y de la polarización de la muestra.
- En el apartado 5.7 se describe como determinar el coeficiente de emisión secundaria a partir de las medidas de la corriente en muestra, polarizada positivamente y no polarizada (a tierra), así como la influencia de algunos parámetros como el potencial de G2 y del Focus en la medida de este coeficiente.

Las condiciones de trabajo del filamento del cañón de electrones fueron: 1,3 V, una corriente de alimentación en torno a 1,5 A y una corriente de emisión de electrones con un valor máximo de 3 μ A. El valor del potencial de G1 se fijó en todas las medidas a 0 V.

En estas condiciones, el valor estimado de la densidad de corriente incidente (J) para una corriente en muestra de 1×10^{-6} A y considerando un diámetro del haz de electrones de 3 mm es de:

$$J = \frac{I_m}{\text{Área}} = \frac{1 \times 10^{-6} \text{ A}}{\pi \left(\frac{3 \times 10^{-3}}{2} \right)^2} \approx 0,14 \left(\frac{\text{A}}{\text{m}^2} \right) = 1,4 \times 10^3 \left(\frac{\text{A}}{\text{cm}^2} \right)$$

La densidad de electrones incidente n_i por unidad de tiempo, que es el número de electrones incidente por unidad de superficie y unidad de tiempo es:

$$n_i = \frac{J}{|q_e|} = \frac{1,4 \times 10^3 \left(\frac{\text{A}}{\text{cm}^2} \right)}{1,6 \times 10^{-19} \text{ C}} \approx 9 \times 10^{21} (\text{n}^\circ \text{ electrones/s} \cdot \text{cm}^2)$$

mientras que la dosis de electrones por unidad de tiempo, D_i , que mide el número total de electrones que por segundo inciden sobre la muestra tiene un valor:

$$D_i = \frac{I_m}{q_e} = 6 \times 10^{12} (\text{n}^\circ \text{ electrones/s})$$

En el caso del barrido en Energía con el potencial del Focus ajustado a la ecuación de la parábola de mínimo *spot*, puede considerarse que el diámetro medio del haz es de 0.4mm. En este caso los valores de la densidad de corriente incidente, densidad de electrones incidente y dosis de electrones en la muestra son, respectivamente:

$$J = 8 \times 10^3 \left(\frac{A}{cm^2} \right)$$

$$n_i = 5 \times 10^{23} (n^\circ \text{ electrones} / s \cdot cm^2)$$

$$D_i = 6 \times 10^{12} (n^\circ \text{ electrones} / s)$$

A continuación se pasa a describir en detalle cada uno de los experimentos realizados:

5.1. Barrido lineal en Energía.

Se realizaron varios experimentos barriendo el voltaje asociado a la Energía del haz de electrones incidente para comprobar que la Energía aumenta de forma lineal en el tiempo y a la velocidad previamente fijada.

En la Figura 5.1 se representa la Energía del haz de electrones en función del tiempo para una velocidad de incremento de la Energía de 10 eV/s, y una tensión del Focus dependiente de la Energía como $F = 0.75E$.

Las condiciones de medida han sido:

Energía: 0-500eV
Variable “a”: 0
Variable “b”: 0.75
Potencial: 0V
 ΔE : 1eV
 Δt : 0.1s
G1: 0V
G2: 50V

Se comprueba que la Energía del haz de electrones incidente aumenta de forma lineal con el tiempo a una velocidad constante, en este caso de 10 eV/s. Esta condición se cumple para todos los modos de barrido en Energía.

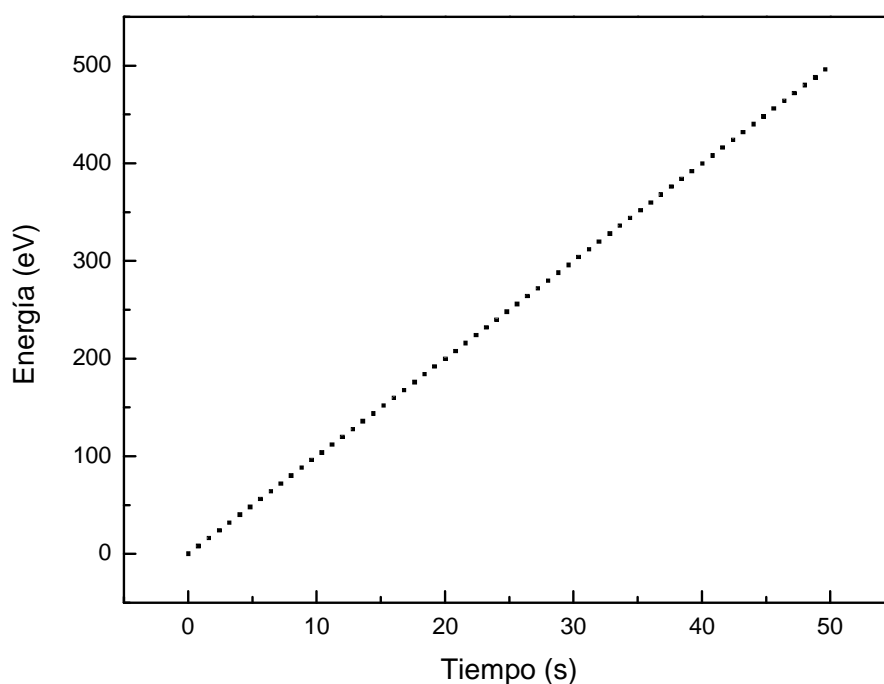


Figura 5.1. Variación de la Energía del haz de electrones en función del tiempo

En la Figura 5.2 se representa la Intensidad de la corriente en muestra en función de la Energía para las condiciones establecidas anteriormente, y se comprueba que corresponde a los incrementos de Energía y tiempo establecidos: $\Delta E = 1$ eV, $\Delta t = 0.1$ s. Además, se observa que la Intensidad de la corriente aumenta con la Energía del haz, lo que es de esperar.

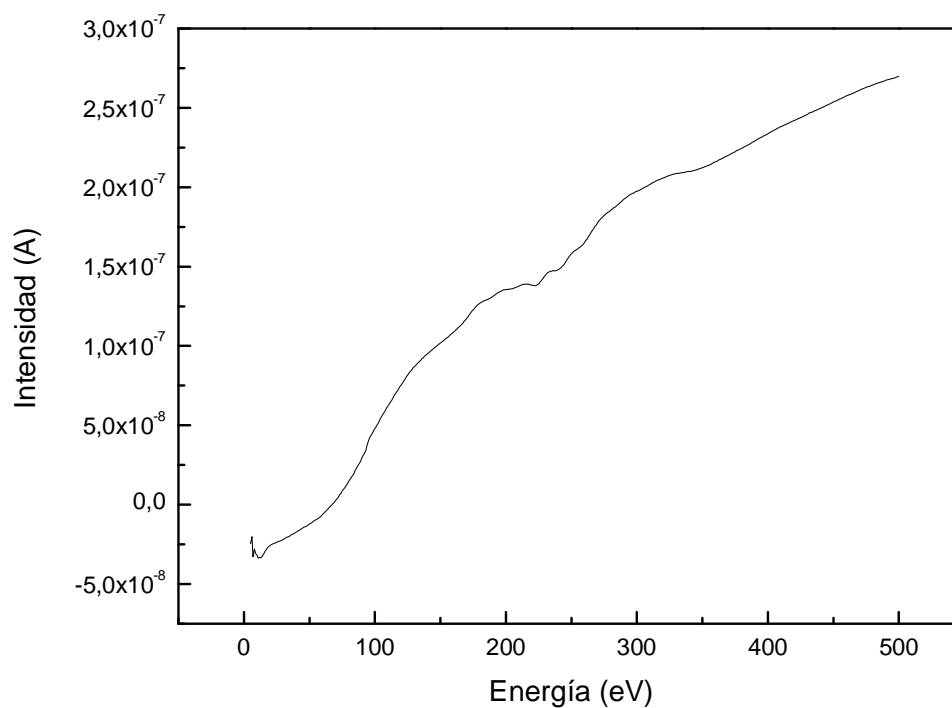


Figura 5.2. Representación de la Intensidad en función de la Energía

5.2. Barrido lineal del voltaje de Focus.

Para comprobar que el voltaje del Focus también variaba linealmente, se realizó un barrido manteniendo la Energía del haz constante.

En la Figura 5.3 se representa el voltaje del Focus en función del tiempo para un valor de de Energía de 750 eV.

Condiciones de medida:

Focus: 0-1000V

Potencial: +40V

Energía: 750eV

ΔF : 1V

Δt : 0.1s

G1: 0V

G2: 50V

Se observa que el barrido de la tensión del Focus varía de forma lineal, a una velocidad constante, de 10 V/s en este caso, tal y como se deseaba.

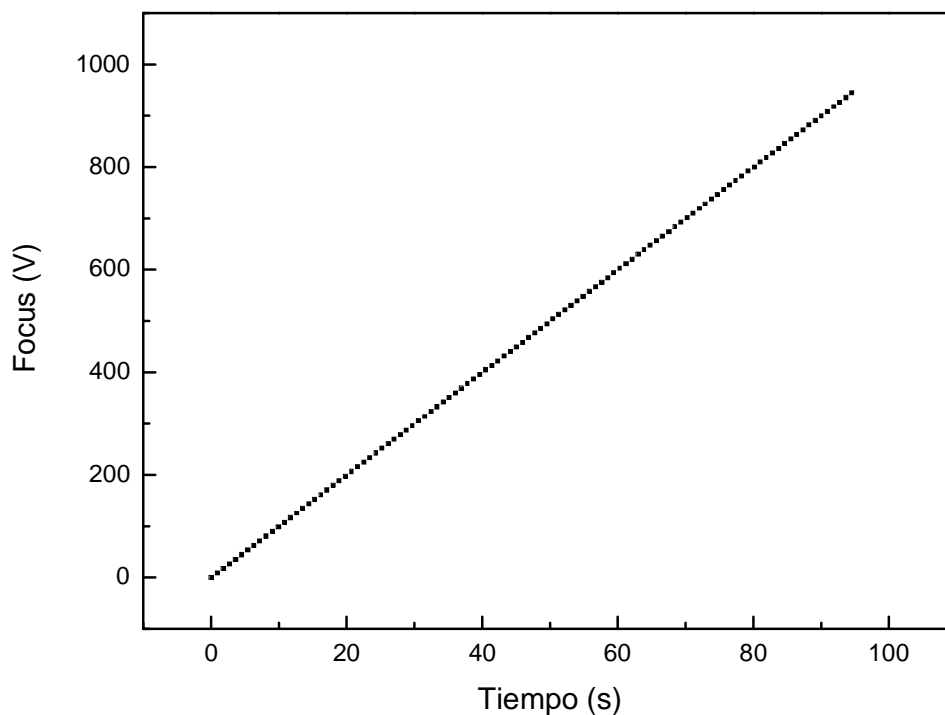


Figura 5.3. Representación del voltaje de Focus en función del tiempo

La Intensidad de corriente en muestra medida en función de la tensión del Focus para las condiciones anteriormente fijadas se representa en la Figura 5.4.

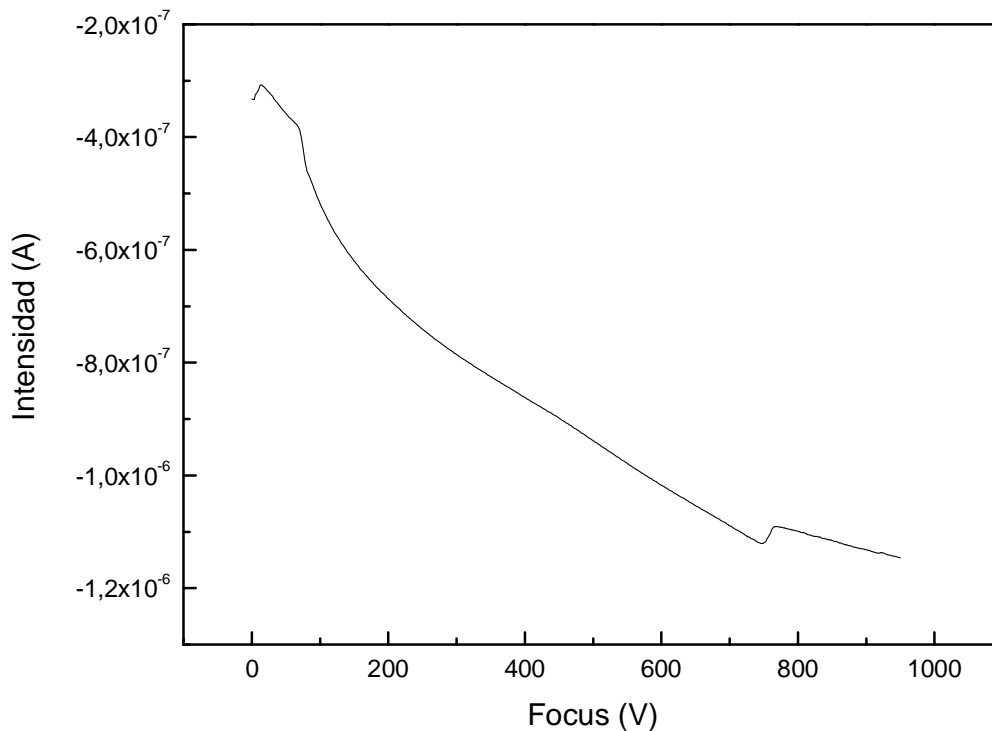


Figura 5.4. Representación de la Intensidad en función del voltaje de Focus

Esta gráfica muestra cómo, a pesar de mantener constante la Energía del haz de electrones incidente, su Intensidad varía con la tensión de Focus, siendo en este caso un factor de 3 más intensa a 1000 V respecto a 0 V. Este hecho se tendrá en cuenta en los resultados posteriores, y fundamentalmente en la determinación del coeficiente de emisión secundaria.

5.3 Comparación de las curvas (I-E) en modo automático y manual.

Una vez comprobada la linealidad en el barrido del voltaje de la Energía y del Focus, así como la correcta adquisición de los valores de la corriente en muestra, se comparó si los valores obtenidos para las curvas (I-E) son los mismos en modo manual y en modo automático.

Para las medidas en modo manual se cambió a modo manual el selector de la parte posterior de la fuente de alimentación del cañón de electrones, y manualmente se fijó el potencial del Focus a 750 V y se fue incrementando en 50 eV la Energía del haz de electrones hasta 450 eV, y en incrementos de 100 eV hasta los 1000 eV. Para la medida de la corriente en muestra se utilizó un amperímetro diferente (Keithley 145A), y para la polarización de la muestra se utilizó una fuente de tensión Agilent E3612A.

Se realizaron los experimentos cuyos resultados se muestran en la Figura 5.5; la línea continua representa las curvas I-E obtenidas con el programa (modo automático): en color azul para la muestra no polarizada y en color rojo para la muestra polarizada a 50 V, mientras que los valores obtenidos en modo manual para las mismas condiciones están representados con cuadros (muestra no polarizada) y con círculos (muestra a 50 V).

Condiciones de medida:

Ejemplo 1

Energía: 0-1000eV

Potencial: 0V

Focus: 750V

ΔE : 5eV

Δt : 0.1s

Ejemplo 2

Energía: 0-1000eV

Potencial: +50V

Focus: 750V

ΔE : 5eV

Δt : 0.1s

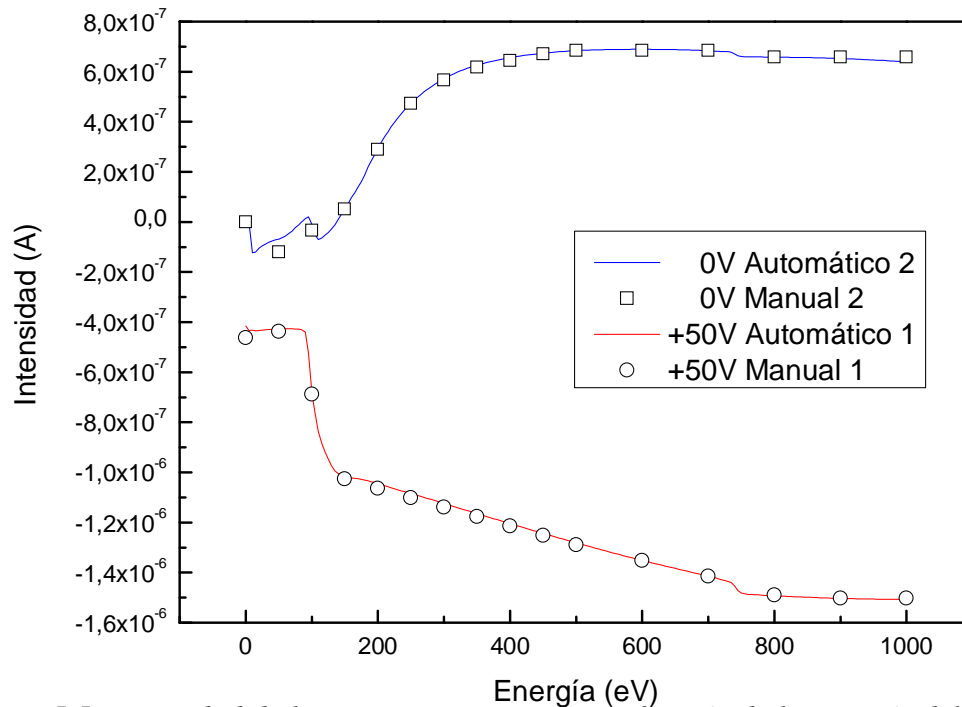


Figura 5.5. Intensidad de la corriente en muestra en función de la Energía del haz para medidas realizadas en modo manual y en modo automático

Se observa que los valores I-E obtenidos en el modo manual coinciden, dentro de las incertidumbres inherentes al método de medida, con las curvas obtenidas en modo automático, lo que muestra que los voltajes de la Energía del haz y Focalización son los correctos, así como las medidas de la corriente en muestra, probando el correcto funcionamiento del programa de automatización desarrollado en este Proyecto.

5. 4. Condiciones de barrido para obtener un *spot* mínimo.

El programa desarrollado permite hacer el barrido en Energía asignando en cada instante el valor de voltaje del Focus para condiciones de *spot* mínimo del haz de electrones. Como se describió en el apartado 2.3.10, el ajuste parabólico para la dependencia del potencial del Focus con la Energía se obtuvo a partir de los coeficientes polinómicos que mejor aproximan la curva de F-E de los datos proporcionados por el fabricante (Figura 2.18). En estos experimentos se ha realizado el barrido en Energía ajustando el voltaje del Focus a la parábola (Figura 5.6) y también a la recta de mínimo *spot* (Figura 5.7).

5.4.1 Ajuste de voltaje de Focus a una Parábola.

Condiciones de medida:

Ejemplo 1 (No Polarizada)

Energía: 0-1000eV

Potencial: 0V

Focus: ajustado a la parábola

ΔE : 5eV

Δt : 0.2s

G2=100V

Ejemplo 2 (Polarizada)

Energía: 0-1000eV

Potencial: +40V

Focus: ajustado a la parábola

ΔE : 5eV

Δt : 0.2s

G2=100V

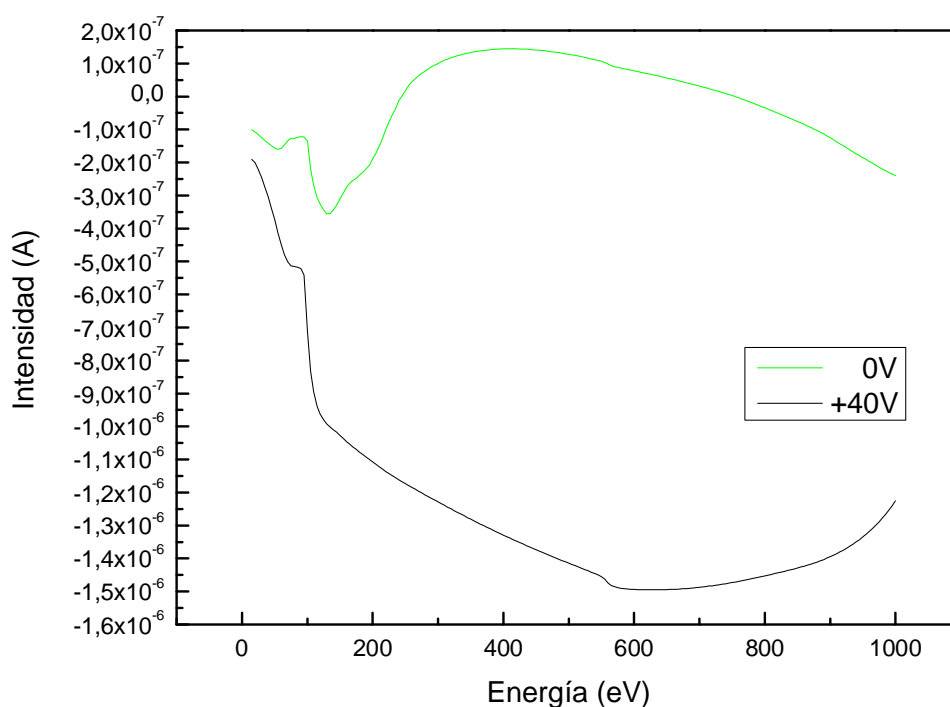


Figura 5.6. Intensidad de corriente en función de la Energía ajustando el voltaje del Focus a una parábola

Se observa que cuando el potencial es positivo la corriente es negativa ya que se mide la corriente de electrones que inciden sobre la muestra, porque al estar la muestra polarizada a +40 V prácticamente no hay emisión secundaria de electrones. El pico de mayor intensidad se produce alrededor de los 600 eV para la muestra polarizada a un potencial de +40 V y a 400 eV para la muestra polarizada a 0 V.

5.4.2 Ajuste de voltaje de Focus a una Recta.

La ecuación de la recta que nos permite ajustar el voltaje del Focus para obtener el *spot* mínimo es la siguiente: $F=11,25+0,16E$. Se han representado varias curvas a diferente potencial para observar cómo cambia la corriente con el valor de la polarización.

Condiciones de medida:

Energía: 0-1000eV
Focus: 11,25+0,16E
 ΔE : 4eV
 Δt : 0.1s
G1=0V
G2=100V

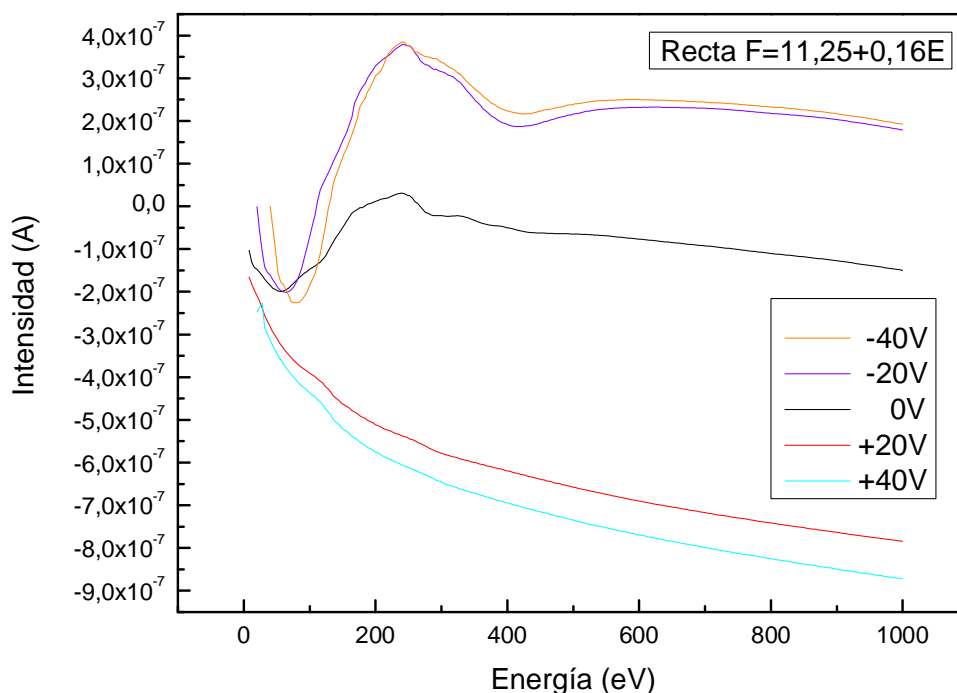


Figura 5.7. Intensidad de la corriente en función de la Energía ajustando el voltaje del Focus a una recta

Se observa que para potenciales negativos la corriente es positiva y que tiene su pico máximo alrededor de los 300 eV, mientras que para potenciales positivos la corriente es negativa y describe una curva más suave que llega a su máximo cuando la Energía es mayor.

Cuando el potencial al que se encuentra la muestra es mayor que 40V (ver Figura 2.2), los electrones de la emisión secundaria no tienen la suficiente energía para escapar de la muestra, de modo que la corriente medida es la corriente incidente del cañón de electrones.

En cambio, si el potencial de la muestra es negativo, los electrones de la emisión secundaria son repelidos con mayor fuerza por la carga negativa de la muestra y tenemos como resultado que la corriente medida es la corriente que sale (emisión secundaria) menos la que entra (la corriente del cañón de electrones).

5.5. Variación de la Intensidad de la corriente en función del potencial del ánodo (G2).

Con el programa desarrollado podemos controlar la Energía y la tensión del Focus, pero el cañón dispone de otros parámetros que también se controlan desde la fuente de alimentación, entre ellos el potencial del Ánodo (G-2), que regula la emisión de electrones procedentes del cátodo. Una variación en cada uno de estos controles tiene una gran influencia en la corriente del haz.

En la Figura 5.8 se muestra la Intensidad en función de la Energía para dos valores del potencial de G2: 50 V y 100 V.

Condiciones de medida:

Energía: 0-1000eV

Focus: 0.75E

Potencial: 0V

ΔE : 2eV

Δt : 0.1s

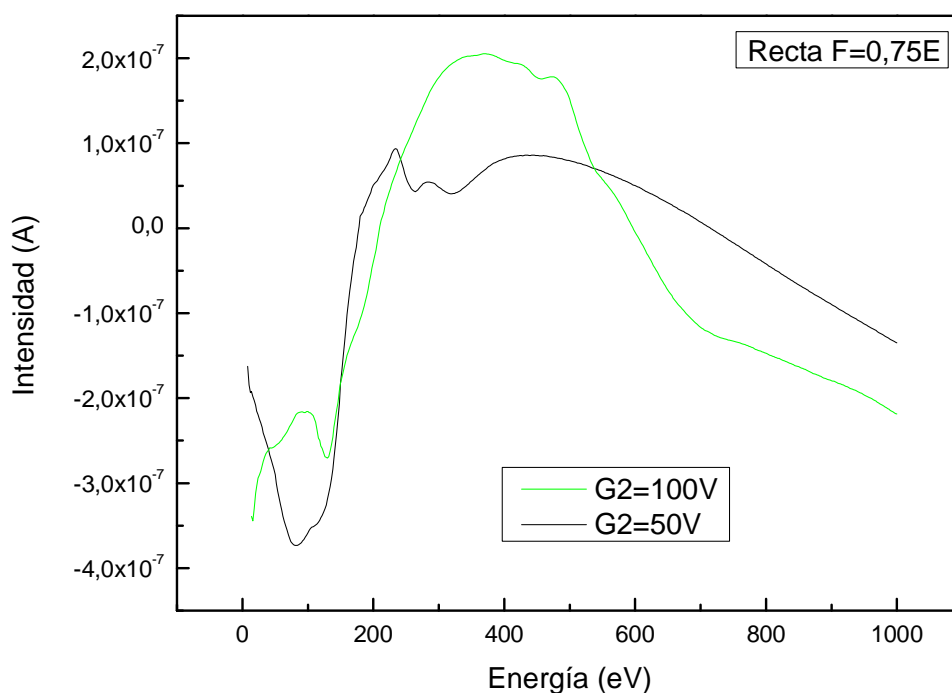


Figura 5.8. Intensidad en función de la Energía para diferentes potenciales de G2

Para G2=100 V el valor máximo de la curva I-E es un orden de magnitud mayor que para G2=50 V, y se produce entre los 300 eV y los 500 eV de Energía. Sin embargo, después de este intervalo la Intensidad cae bruscamente mientras que la pendiente es más suave en el caso de la curva G2=50 V. Se comprueba que la emisión de corriente aumenta con el valor de G2, como se indica en las especificaciones del cañón de electrones (ver Figura 2.14).

5.6. Variación de la Intensidad en función de la polarización de la muestra.

En la Figura 5.7 se mostró cómo variaba la Intensidad de la corriente en muestra según el signo del potencial de polarización aplicado a la muestra en condiciones de mínimo *spot* ajustando el voltaje del Focus por $F= 11,25 +0,16 E$. En la Figura 5.9 se muestra la influencia del potencial de polarización en la Intensidad de la corriente para aumentos progresivos del potencial de polarización.

Condiciones de medida:

Energía: 0-1000eV

Focus: 0.75E

ΔE : 2eV

Δt : 0.1s

G2=100V

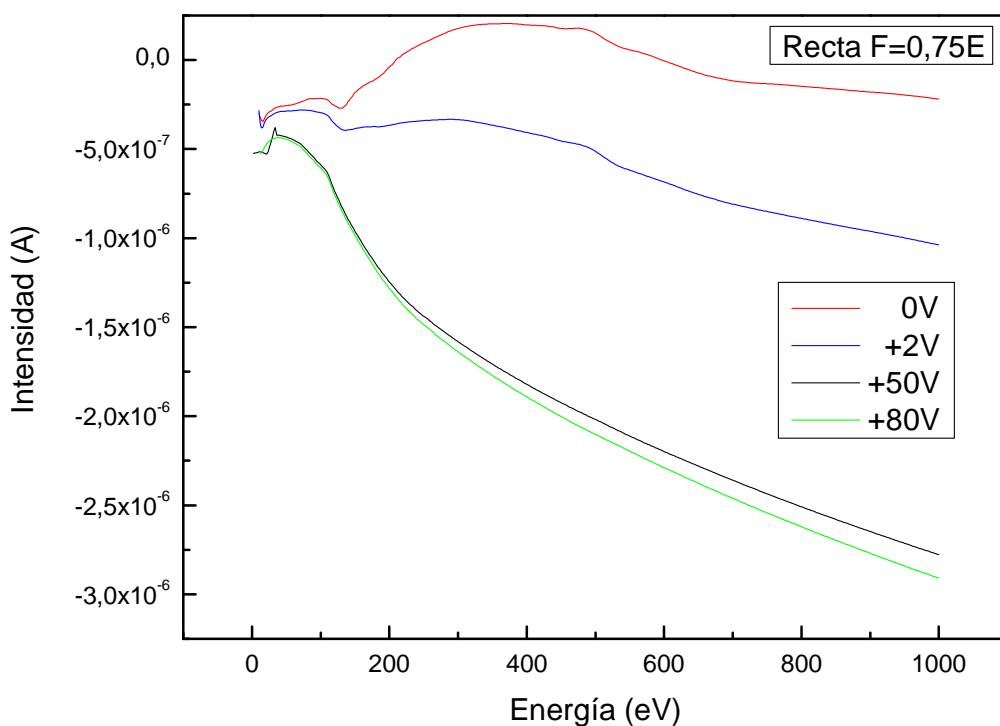


Figura 5.9. Intensidad en función de la Energía para diferentes valores de potencial de la muestra

Comprobamos que cuando el potencial es muy positivo la Intensidad describe una curva suave, ya que la corriente medida es la corriente del cañón de electrones, mientras que cuando el potencial es cero o muy próximo a cero, se añade la emisión secundaria de electrones a la corriente en muestra como se observa en las curvas obtenidas para la muestra polarizada a +2V y no polarizada.

5.7. Cálculo del coeficiente de Emisión Secundaria.

Para el cálculo del coeficiente de emisión secundaria de electrones, δ , se ha utilizado la ecuación número (2.8) descrita en el capítulo 2 según la cual este coeficiente se determina a partir de la diferencia de la Intensidad de corriente en muestra a potencial positivo, en particular +40V ($I_M (+40V)$) y la muestra a tierra ($I_M (0V)$), dividida por la Intensidad de la corriente incidente ($I_M (+40V)$) para su normalización:

$$\delta = \frac{\text{Electrones secundarios}}{\text{Electrones incidentes}} = \frac{I_M (40V) - I_M (0V)}{I_M (40V)}$$

A continuación se detallan varios ejemplos de cálculos del coeficiente de emisión secundaria con distintas condiciones de medida:

- Cálculos del coeficiente de emisión secundaria ajustando el voltaje del Focus con la parábola:

Para las condiciones de medida de la Figura 5.6:

Medida 1

Energía: 0-1000eV

Potencial: 0V

Focus: ajustado a la parábola

ΔE : 5eV

Δt : 0.2s

G2=100V

Medida 2

Energía: 0-1000eV

Potencial: +40V

Focus: ajustado a la parábola

ΔE : 5eV

Δt : 0.2s

G2=100V

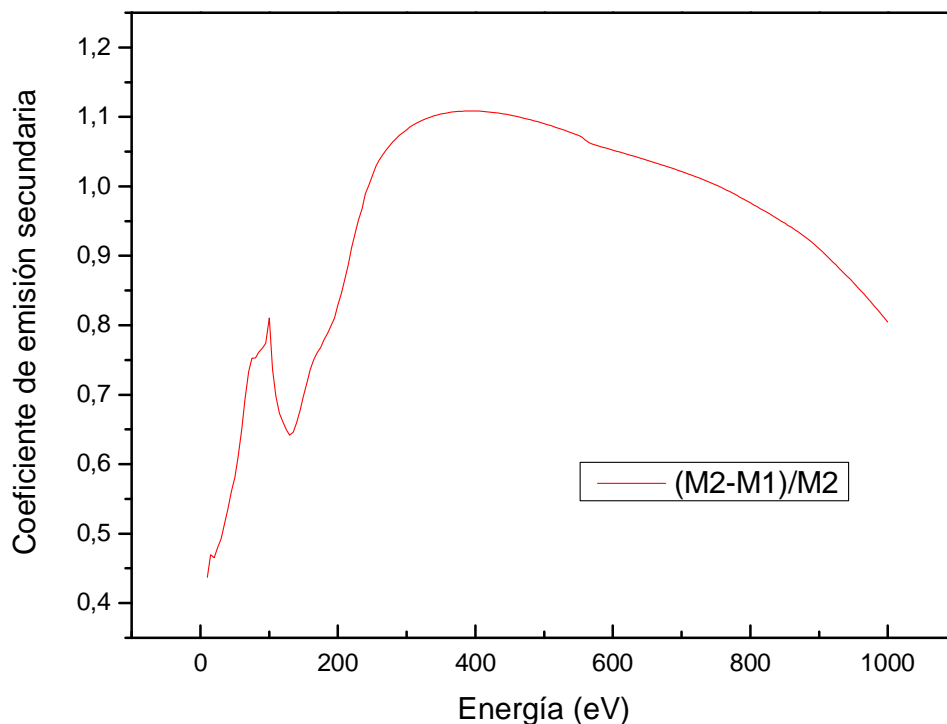


Figura 5.10. Representación del coeficiente de emisión de electrones secundarios en función de la Energía ajustando el voltaje del Focus a una parábola

Se observa que hay un pico inicial de emisión alrededor de los 100 eV, posteriormente el coeficiente de emisión de electrones secundarios aumenta de forma brusca hasta un valor de 1,1 para una energía próxima a 350 eV, y para valores mayores de energía el coeficiente de emisión disminuye ligeramente hasta el valor de 0,8 a 1000 eV.

- Cálculos del coeficiente de emisión secundaria ajustando el voltaje del Focus con la recta:

Para las condiciones de medida de la Figura 5.7:

Medida 3

Energía: 0-1000eV

Potencial: 0V

Focus: $F=11.25+0.16E$

ΔE : 4eV

Δt : 0.2s

G2=100V

Medida 4

Energía: 0-1000eV

Potencial: +40V

Focus: $F=11.25+0.16E$

ΔE : 4eV

Δt : 0.2s

G2=100V

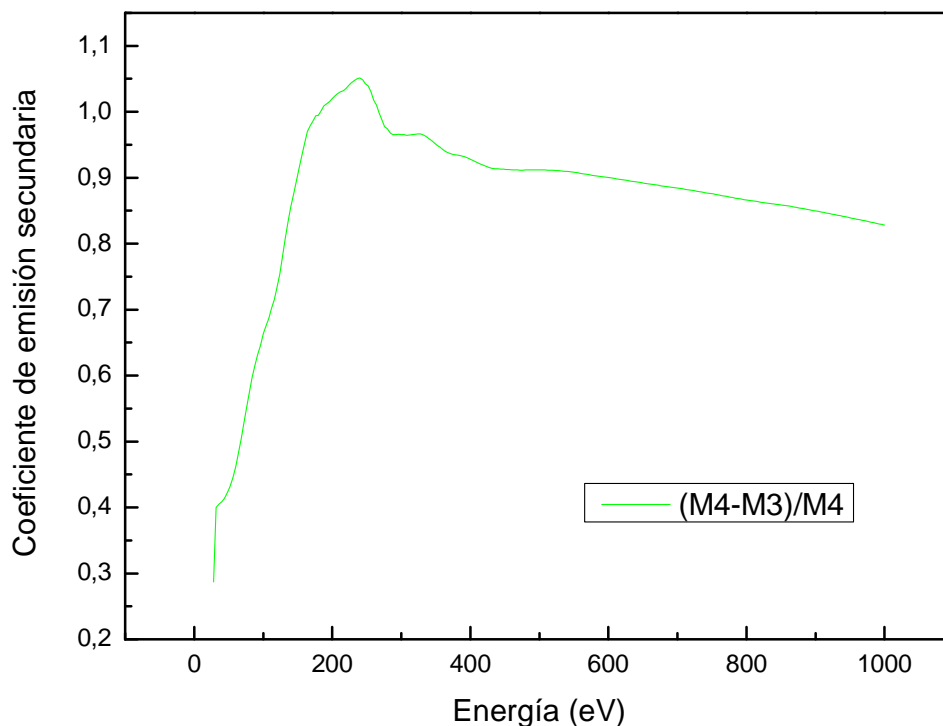


Figura 5.11. Representación del coeficiente de emisión secundaria en función de la Energía ajustando el voltaje del Focus a una recta

El coeficiente de emisión secundaria aumenta muy rápido entre 0 y 250 eV, donde alcanza su valor máximo, $\delta \approx 1,05$, y posteriormente decae con una suave pendiente hasta un valor de $\delta \approx 0,8$ para una Energía de 1000 eV.

- Cálculos del coeficiente de emisión secundaria ajustando el voltaje del Focus con la recta $F=0.75E$:

En las condiciones de medida de la Figura 5.9:

<u>Medida 5</u>	<u>Medida 6</u>	<u>Medida 7</u>
Energía: 0-1000eV	Energía: 0-1000eV	Energía: 0-1000eV
Potencial: 0V	Potencial: +50V	Potencial: +80V
Focus: 0.75E	Focus: 0.75E	Focus: 0.75E
ΔE : 2eV	ΔE : 2eV	ΔE : 2eV
Δt : 0.1s	Δt : 0.1s	Δt : 0.1s
G2=100V	G2=100V	G2=100V

Se ha calculado el coeficiente de emisión secundaria para dos casos diferentes, para la muestra polarizada a +50 V y para +80 V. Se representan los resultados obtenidos en la Figura 5.12 superpuestos para poder compararlos.

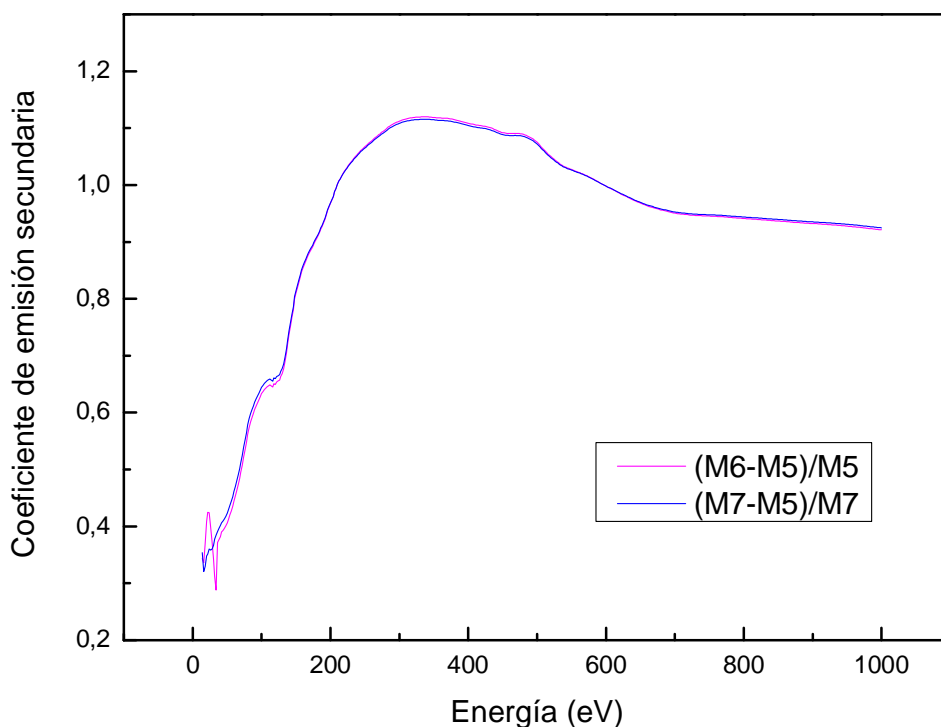


Figura 5.12. Representación del coeficiente de emisión secundaria en función de la Energía ajustando el voltaje del Focus a la recta $0.75E$

Se comprueba que el coeficiente de emisión secundaria es similar en ambos casos. El coeficiente de emisión secundaria aumenta de forma casi lineal hasta $\delta \approx 1,1$ a 300 eV, y posteriormente disminuye suavemente hasta $\delta \approx 0,9$ para una Energía de 1000 eV.

En este caso se observa que la curva que describe el comportamiento del coeficiente de emisión secundaria en función de la energía del haz incidente es muy similar a la curva de la emisión de los electrones secundarios “verdaderos” (δ ts) de la Figura 2.3.

A continuación, en la Figura 5.13, se representan conjuntamente los coeficientes de emisión secundaria para los últimos cuatro experimentos, correspondientes al ajuste del voltaje del Focus una parábola (Fig. 5.10) y a los tres ajustes del voltaje a una recta: uno a $F=11.25+0.16E$ (Fig. 5.11) y dos para $F=0.75E$ (Fig. 5.12).

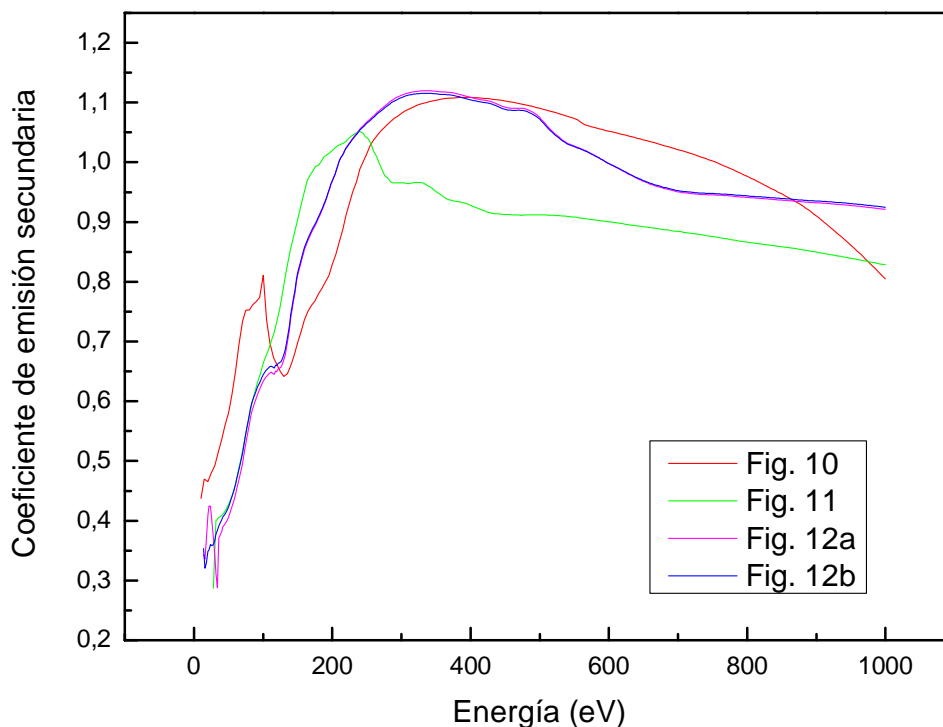


Figura 5.13. Comparación del coeficiente de emisión secundaria para los distintos experimentos realizados

Para los cuatro casos se observa que la emisión aumenta al principio de forma más rápida hasta llegar al máximo entre 200 y 400 eV, y a partir de ahí desciende suavemente.

La curva de la Figura 10 tiene un doble pico al principio probablemente debido a que la velocidad de barrido era alta (25 eV/s) y las condiciones del potencial de Focus más inestables al ser de variación parabólica para mínimo *spot*. A partir de los 200 eV describe una trayectoria similar a las curvas de la Figura 12.

El comienzo de la curva de la Figura 11 se comporta de forma similar a las curvas de la Figura 12, pero su pico máximo es inferior y tiene una brusca caída a los 200 eV, aunque después decrece de forma suave. El comportamiento de la curva también puede ser debido a que al estar el potencial del Focus con valores de *spot* mínimo, en el barrido, de un salto de voltaje de Focus al siguiente puede haber una variación muy grande en el tamaño del *spot*, tal y como se puede ver en la Figura 2.25.

Las curvas 12a y 12b tienen un comportamiento intermedio a las otras dos, una variación suave y un valor más alto del coeficiente de emisión secundario.

Estos resultados ponen de manifiesto que es preferible utilizar una relación del potencial del Focus y del cátodo altas ($F=0.75E$) y evitar las condiciones de *spot* mínimo si las condiciones experimentales lo permiten.

- Estimación de la primera energía de cruce E_I .

En la Figura 5.14 se ha representado el coeficiente de emisión secundaria calculado para las Medidas 5 y 7, representadas en la Figura 5.12, señalando en este caso el valor de coeficiente de emisión secundaria máximo (δ_m), la energía a la que se produce este máximo (E_m) y las energías primera y segunda de cruce (E_I y E_{II}).

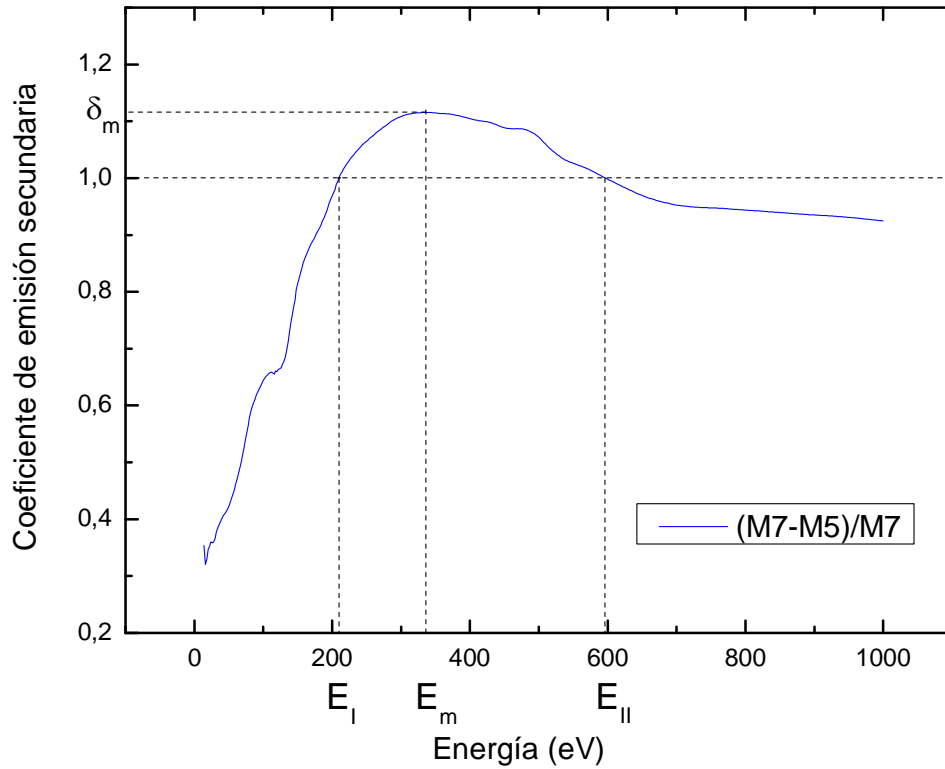


Figura 5.14. Representación del coeficiente de emisión secundaria en función de la Energía del haz incidente con su máximo y las energías de cruce

El valor de E_I puede ser estimado a partir de los valores de δ_m y E_m , tal como se explicó en el capítulo 2. La ecuación que nos permite hallar E_I es la siguiente:

$$E_I = E_m \cdot e^{-\sqrt{5 \ln \delta_m}} \text{ (eV)}$$

Se han realizado los cálculos para obtener el E_I teórico de la curva experimental (M7-M5)/M7 de la Figura 5.14 y comprobarlo con el valor experimental.

La determinación del coeficiente de emisión secundaria máximo, δ_m , se hace a partir de los valores de las corrientes en la muestra, a 50 V ($I_m(+50)$) y a 0 V ($I_m(0)$):

$$\delta_m = \frac{I_m(+50) - I_m(0)}{I_m(+50)} = 1,12$$

donde:

$$E_m = 336 \pm 1 \text{ eV}$$

$$I_m(0) = 2,007 \times 10^{-7} \pm 5 \times 10^{-10} \text{ A}$$

$$I_m(+50) = -1,674 \times 10^{-6} \pm 5 \times 10^{-9} \text{ A}$$

y el error del coeficiente de emisión secundaria máximo se obtiene a partir de la expresión:

$$\Delta\delta_m = \left| \frac{2\Delta I(+50)}{I(+50)} \right| + \left| \frac{\Delta I(0)}{I(+50)} \right| + \left| \frac{I(0)\Delta I(+50)}{I^2(+50)} \right| = 1 \times 10^{-2}$$

de modo que el coeficiente de emisión secundaria máximo y su error es:

$$\delta_m = 1.12 \pm 0.01$$

A partir de los valores de δ_m y E_m , podemos calcular la primera energía de corte E_I sustituyendo en la siguiente ecuación que ya se mostró en el capítulo 2:

$$E_m = 336 \pm 1 \text{ eV}$$

$$\delta_m = 1,12 \pm 0,01$$

$$E_I = E_m \cdot e^{(-\sqrt{5 \ln \delta_m})} = 336 \cdot e^{(-\sqrt{5 \ln 1,1157})} = 160 \text{ eV}$$

y el error de la primera energía de corte E_I :

$$\begin{aligned} \Delta E_I &= \left| \frac{\partial E_I}{\partial E_m} \right| \Delta E_m + \left| \frac{\partial E_I}{\partial \delta_m} \right| \Delta \delta_m = \\ &= \left| e^{-\sqrt{5 \ln \delta_m}} \Delta E_m \right| + \left| E_m \cdot e^{-\sqrt{5 \ln \delta_m}} \times \left(-\sqrt{5} \times \frac{1}{2} (\ln \delta_m)^{-\frac{1}{2}} \times \frac{1}{\delta_m} \right) \Delta \delta_m \right| = 5 \text{ eV} \end{aligned}$$

Por tanto nos sale un E_I teórico de $(160 \pm 5) \text{ eV}$, mientras que el resultado experimental obtenido de la gráfica 5.14 corresponde a $(210 \pm 1) \text{ eV}$.

Un valor teórico inferior al experimental puede ser debido al cubrimiento de carbono que recubre el acero, en buen acuerdo con resultados experimentales de otros autores².

- **La curva universal del coeficiente de emisión secundaria.**

La curva de la Figura 2.5 es una Gaussiana en el logaritmo de E_p/E_m de acuerdo a la expresión:

$$\frac{\delta}{\delta_m} = \exp \left\{ - \frac{\left[\ln \frac{E_p}{E_m} \right]^2}{2\sigma^2} \right\}$$

Para comprobar si el coeficiente de emisión secundario obtenido en la curva (M7-M5)/M7 de la Figura 5.14 sigue la curva universal de capítulo 2, y se ajusta también a una Gaussiana, se ha representado en la Figura 5.15 el valor reducido del coeficiente de emisión secundaria, definido como δ/δ_m en función de E_p/E_m , con la relación de energías en escala de logarítmica:

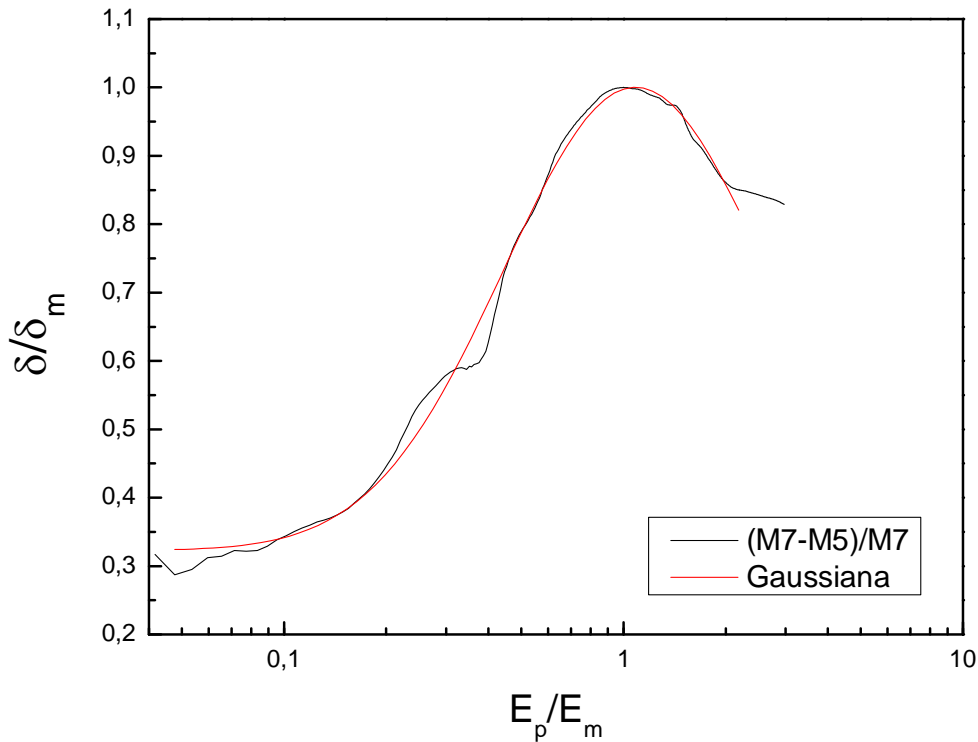


Figura 5.15. Parámetro δ/δ_m en función de E_p/E_m y comparación con una Gaussiana

También en la Figura 5.15 se ha representado el ajuste de la curva a una Gaussiana, cuya relación y los parámetros obtenidos están dados por:

$$\omega = 2\sigma = 1,775 \pm 0,012$$

$$x_c = 0,078 \pm 0,003$$

$$\frac{\delta}{\delta_m} \propto e^{-\left[\frac{(x-x_c)}{\omega/2}\right]^2}$$

Por lo tanto, podemos concluir que los valores reducidos del coeficiente de emisión de electrones secundarios para el acero corrugado estudiado siguen el comportamiento de la curva universal.



6. RESUMEN Y CONCLUSIONES

6. RESUMEN Y CONCLUSIONES.

Este capítulo resume los trabajos realizados en este proyecto de automatización del control del cañón de electrones disponible en el Laboratorio de Superficies del Departamento de Física de la Universidad Carlos III y de la medida de la corriente en muestra para determinar la emisión de electrones secundarios producidos por el haz de electrones incidente en una superficie situada en un entorno de ultra-alto vacío.

La realización del presente proyecto ha implicado previamente:

- Estudio de los fundamentos de la emisión secundaria de electrones y cómo a partir de las medidas de corriente de electrones con la muestra polarizada y a tierra se puede obtener el coeficiente de emisión de electrones secundarios.

- La familiarización con el sistema de ultra-alto vacío y con la instrumentación de control y medida solidaria al mismo. El equipo con el que se ha trabajado se compone de un cañón de electrones Kimball ELG-2, una fuente de alimentación EGPS-2B, un picoamperímetro Keithley modelo 6487 con el que medimos la corriente en muestra, una tarjeta de adquisición PCI-6024E con la que suministramos el voltaje a la fuente de alimentación, y una tarjeta GPIB-USB-HS de National Instruments con la que comunicamos el picoamperímetro y el PC, además de una campana de ultra-alto vacío (donde está situada la muestra) que incorpora los sistemas de bombeo y medición de vacío necesarios y proporcionan una presión de $\sim 10^{-10}$ mbar.

- El aprendizaje del lenguaje de programación Gráfica (lenguaje G) en el que se basa la herramienta de prueba, control y diseño LabVIEW[®] 8.1.

Como conclusiones fundamentales del proyecto se pueden señalar los siguientes:

Se ha desarrollado una aplicación en la plataforma LabVIEW[®] 8.1 que permite realizar barridos en tres modos diferentes:

1. Barrido en Energía ajustando el voltaje del Focus a una recta o una parábola.
2. Barrido en Energía manteniendo el voltaje del Focus constante a un valor prefijado.
3. Barrido en Focus manteniendo el voltaje de la Energía constante a un valor prefijado.

En cualquiera de los tres modos se pueden realizar las siguientes tareas:

- a) Polarizar la muestra a un potencial de -100 a +100 V.

- b) Barrido en Energía de 5 eV hasta 1000 eV (o Focus de 0 V a 1000 V en la tercera aplicación) a una velocidad fijada por el usuario. El incremento de Energía para cada iteración puede ser desde 0,5 eV hasta 995 eV, mientras que para el barrido en Focus el incremento puede ser desde 0,1 V hasta 1000 V.

c) Seleccionar el tiempo que queremos que transcurra entre un incremento y otro durante el barrido en Energía o tensión de Focus. Se pueden seleccionar valores entre 0,1 y 1000 segundos.

d) Simultáneamente para cada valor de Energía (t) permite ajustar el voltaje del Focus a una recta $F=a+bE$ o una parábola para obtener un tamaño de *spot* mínimo en el haz de electrones. En caso de seleccionar en el panel frontal ajustar el voltaje del Focus a una recta tenemos la posibilidad de definir las variables “a” y “b”. La variable “a” admite valores entre 0 y 1000, mientras que la variable “b” permite valores entre 0 y 1.

e) Medir la Intensidad de la corriente en muestra I para cada incremento en Energía o tensión de Focus en un rango desde 2 nA hasta 20 mA, con una precisión de 10 fA hasta 100 nA.

f) En el panel frontal, es posible visualizar en tiempo real los resultados obtenidos en la medida de la corriente en muestra en las gráficas de Energía-tiempo E/t y Corriente-Energía I/E , además de los parámetros que sirven para visualizar en cualquier instante las condiciones en las que se están realizando las medidas, como son el tiempo total de adquisición, el tiempo transcurrido, el Voltaje, la Energía, el voltaje del Focus, y la Intensidad de la corriente en muestra.

g) Los datos obtenidos (tiempo, Energía o voltaje de Focus, Intensidad) se pueden almacenar en un archivo .txt de forma automática, lo que facilita el posterior tratamiento de los datos. El archivo de salida puede ser salvado con un nombre de formato consecutivo o el usuario puede poner a cada medida un nombre diferente.

Es importante destacar la notable mejoría en tiempo y calidad de los resultados de las medidas que supone la utilización de la aplicación desarrollada en los estudios de emisión secundaria de electrones. El sistema funciona de manera automática sin necesidad de la intervención del factor humano, permitiendo por ejemplo realizar barridos en Energía con una precisión de 0,5 eV, en sincronía con la lectura de los valores de corriente en muestra.

Se ha verificado el correcto funcionamiento del programa comprobando la linealidad en el tiempo de los barridos de voltaje correspondientes a la Energía y al Focus, y que estos barridos se realizan a la velocidad fijada; además, se han comparado en modo manual y en modo automático los valores de Intensidad de corriente en función de la Energía del haz para la muestra polarizada y sin polarizar, utilizando dos picoamperímetros y fuentes de tensión para la polarización diferentes, probándose la correcta adquisición de las medidas.

Se han realizado algunos estudios preliminares que muestran las condiciones de barrido del haz en Energía para obtener un *spot* mínimo y las variaciones en la Intensidad de la corriente en muestra en función del potencial del ánodo (G-2) y de la polarización de la muestra.

Se describe cómo determinar el coeficiente de emisión secundaria δ a partir de las medidas de la corriente en muestra, polarizada positivamente y a potencial cero (no polarizada).

Como producto final de esta aplicación se ha desarrollado un ejecutable con un conjunto de librerías dinámicas que permiten la portabilidad del programa.

Se incluye un pequeño manual de usuario simplificado para la utilización de la aplicación desarrollada.

Cabe mencionar el grado de conocimiento del lenguaje LabVIEW[®] que se ha adquirido, teniendo en cuenta que se partía de un nivel cero.

En cuanto a las mejoras propuestas:

La más sencilla es adaptar la aplicación para el control del cañón de electrones para rangos de baja Energía (0-100 eV), y rangos de baja tensión de Focus (0-100 V). La aplicación se ha desarrollado para el caso de High Energy (5-1000 eV) y High Focus (0-1000 V), pero si se necesitara controlar el cañón en condiciones de Low Energy o Low Focus resultaría muy sencillo para las nuevas condiciones ya que en ambos casos la señal de control es de 0 a 10 V. Además, la aplicación se ha desarrollado con una estructura secuencial abierta que permite ir añadiendo de forma sencilla los módulos para el control de nuevos parámetros del cañón de electrones.

Se podría pensar en la automatización de otros controles del cañón de electrones como la Rejilla (G-1) o el Ánodo (G-2), lo que aumentaría la autonomía del sistema, las opciones de barrido serían múltiples y permitiría realizar estudios más complejos.

En este proyecto se ha utilizado una tarjeta de adquisición de datos con 2 salidas analógicas y una resolución de 12 bits, lo que nos ha permitido controlar dos parámetros del cañón de electrones. National Instruments dispone de tarjetas de adquisición con 8 salidas analógicas y una resolución de 16 bits (por ejemplo la tarjeta PCI-7831R, con un precio de unos 2.500€) que, además del voltaje de Focus y la Energía, nos permitiría controlar las tensiones de G-1, G-2, ECC/SOURCE, la Deflexión-X y la Deflexión-Y, de modo que desde nuestra aplicación se podrían fijar todos los parámetros que controlan el cañón de electrones. Además, los 16 bits de resolución de la tarjeta nos permitirían realizar barridos más precisos con incrementos en Energía de 30 meV en lugar de los 0,5 eV actuales.

Por otra parte, desde nuestra aplicación podríamos decidir cómo procesar o tratar los datos medidos como, por ejemplo, calcular el coeficiente de emisión secundaria, añadiendo un módulo al programa que permita realizar esas operaciones. En caso de disponer del software Origin[®] 8.0 o una versión superior, se podrían utilizar las librerías Origin VI's que incorpora y que permiten utilizar LabVIEW[®] 8.1 como una aplicación cliente del programa Origin[®] 8.0, de modo que los datos obtenidos en nuestra aplicación puedan ser salvados como un proyecto de Origin[®] 8.0.



7. BIBLIOGRAFÍA

7. BIBLIOGRAFÍA.

¹ M.A. Furman y M.T.F. Pivi. Simulation of Secondary Electron Emisión Based on a Phenomenological Probabilistic Model. LBNL-52807, SLAC-PUB-9912, June 2, 2003.

² J.J. Scholtz, D. Dijkkamp y R.W.A. Schmitz. Secondary Electron Emisión Properties. Philips Journal of Research, Vol. 50, No. ¾, 1996.

³ Francisco Javier Martínez Sanz. Estudios preliminares sobre la posibilidad de protección frente a la corrosión de estructuras de hormigón armado mediante la aplicación de protección catódica pulsante. Proyecto de fin de máster de ciencia e ingeniería de materiales. Tutora: M^a Asunción Bautista Arija. Septiembre 2008.

Patricia Martín Coto. Estudio y modificación de un sistema de ultra-alto vacío para la incorporación de las técnicas de deserción estimulada por electrones (ESD) y espectroscopia de fotoemisión de rayos x (XPS). Proyecto de fin de carrera de ingeniería industrial. Tutora: Inmaculada Cólera Garzón. Noviembre 2003.

Carlos Gómez González. Automatización del control y de la adquisición de datos de un analizador de electrones Auger. Proyecto de fin de carrera de ingeniería industrial. Tutores: Inmaculada Cólera Garzón y Juan Enrique Muñoz Santiuste. Noviembre 2000.

Manuales:

- Jordi Zaragoza y Lluís Ferrer. Guía rápida de LabVIEW. Universitat Politècnica de Catalunya. Departamento de Ingeniería Electrónica. 2008.
- Manual de LabVIEW. Empezando con LabVIEW *Evaluation Version 7.0*. Abril 2003.
- LabVIEW User Manual. National Instruments. January 1998.
- DAQ PCI-6023E/6024/6025E User Manual. Multifunction I/O Boards for PCI Bus Computers. National Instruments. October 1998.
- Model 6487 Picoammeter/Voltage Source. Keithley. January 2003.
- Custom H.V.-Floated System ELG-2 / EGPS-2 Demountable Electron Gun and Power Supply User Manual. Kimball Physics Inc. 2003.
- NI GPIB-USB-HS User Manual. National Instruments. 2002.

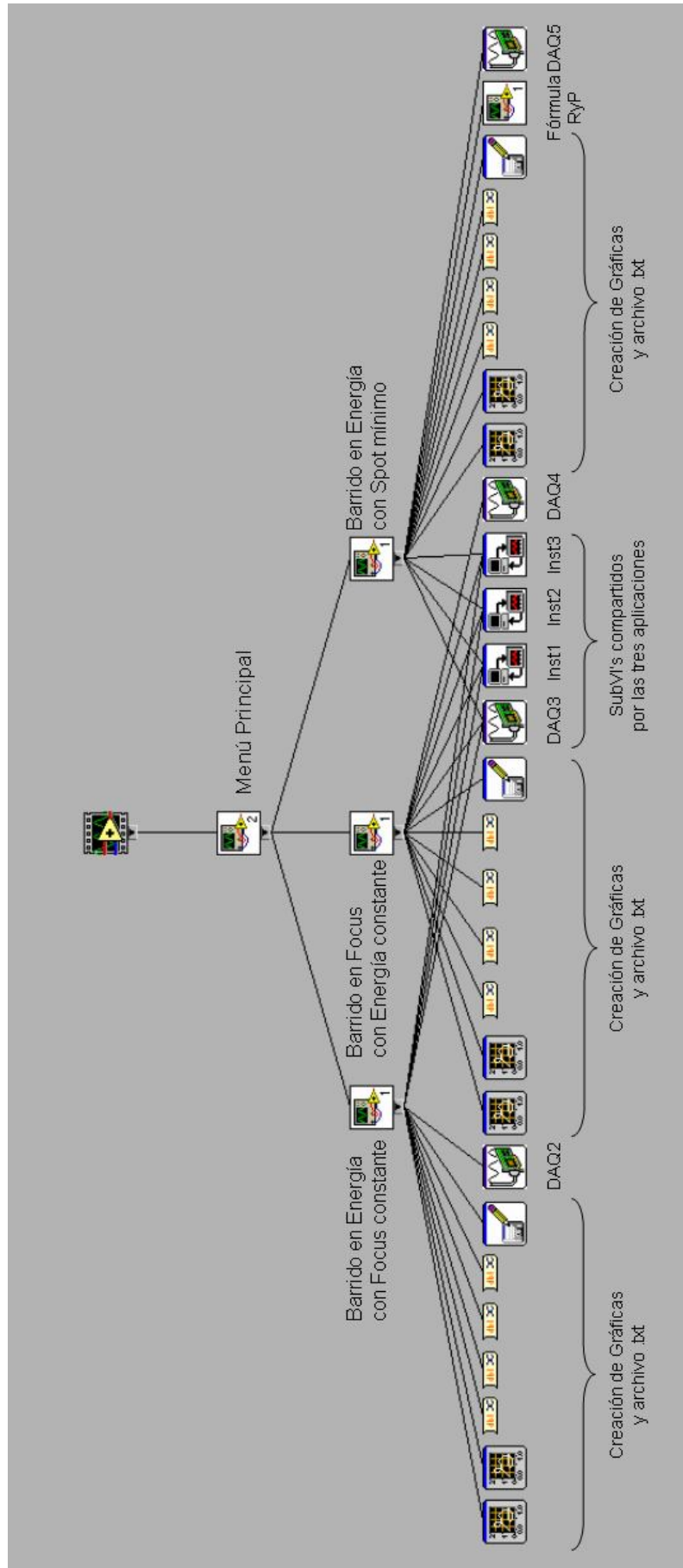
Web Sites:

<http://www.ni.com/>
<http://www.keithley.com/>
<http://www.kimballphysics.com/>



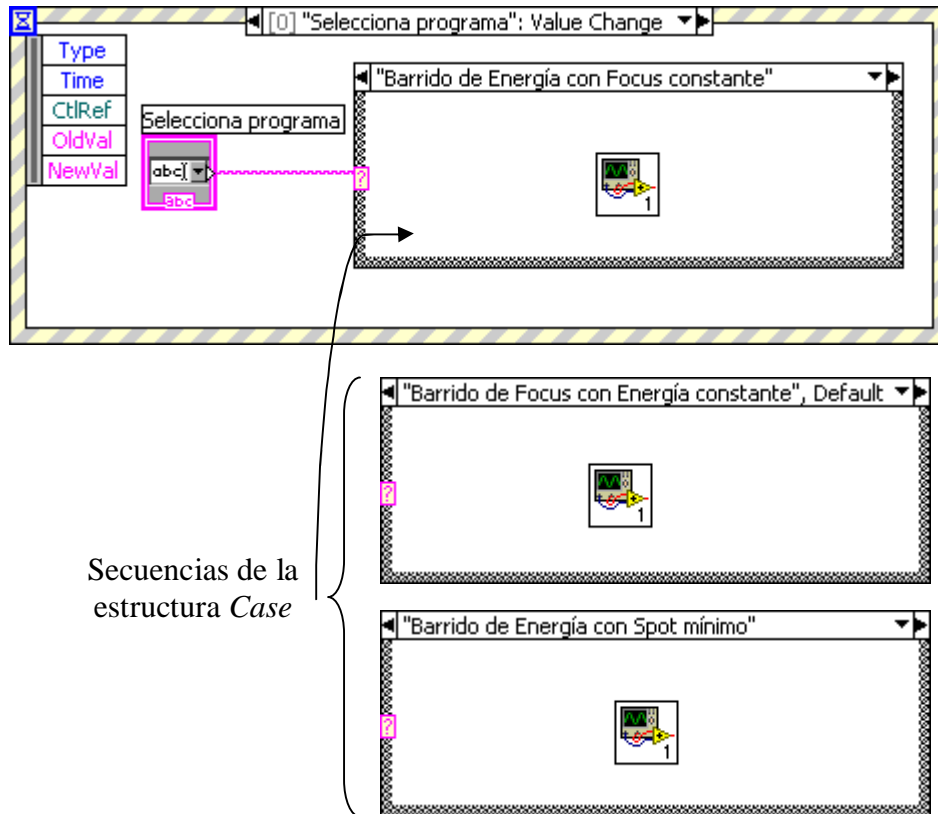
8. ANEXO

8.1. Jerarquía de la aplicación.



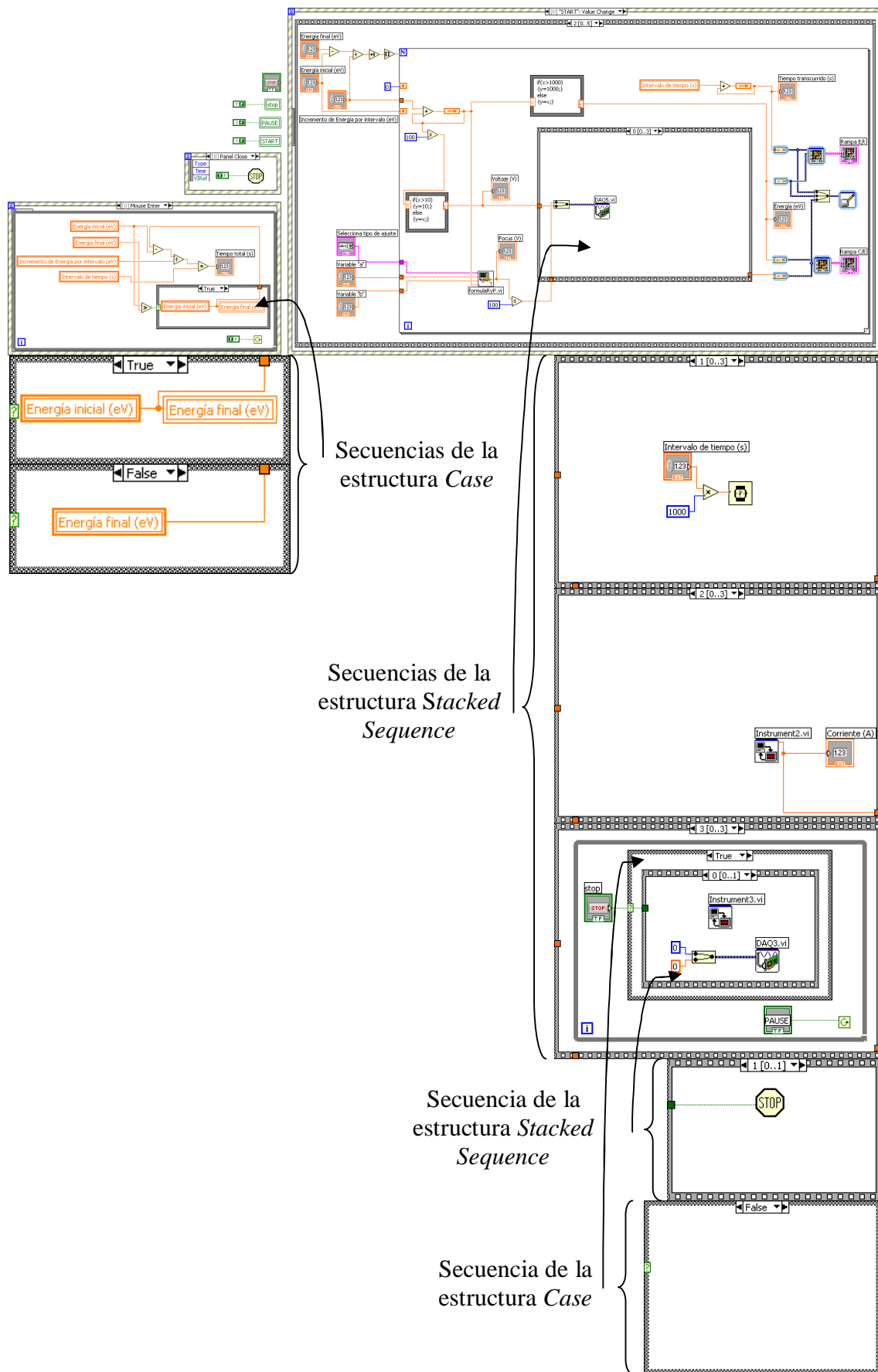
8.2. Menuprincipal.vi

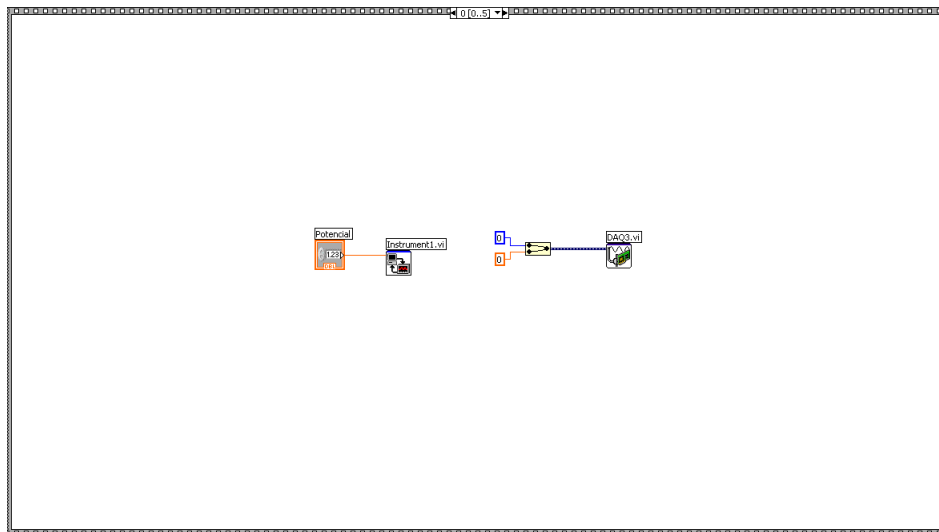
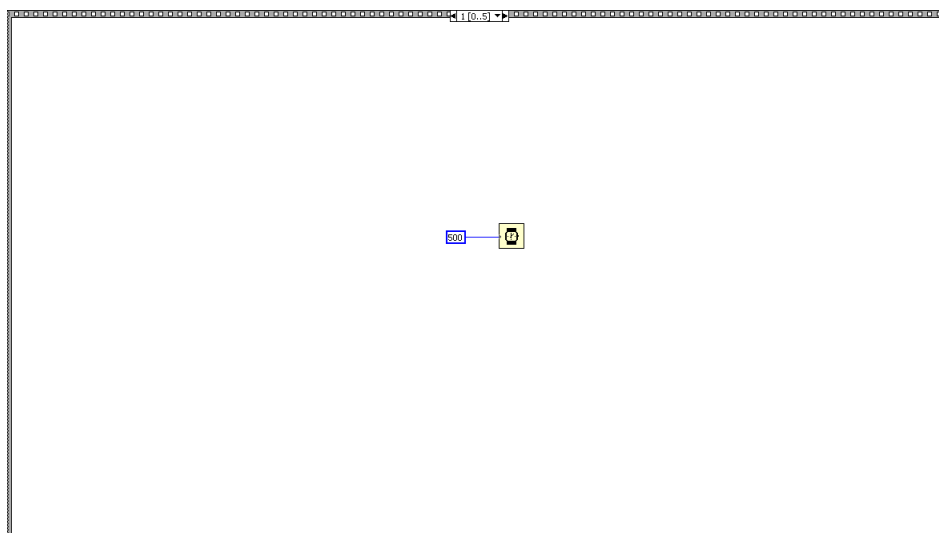
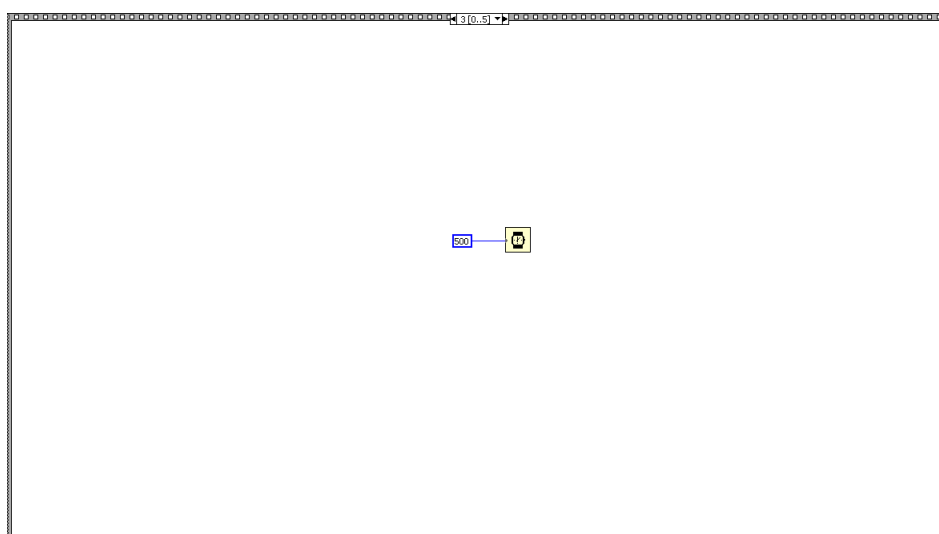
Selección de programa.

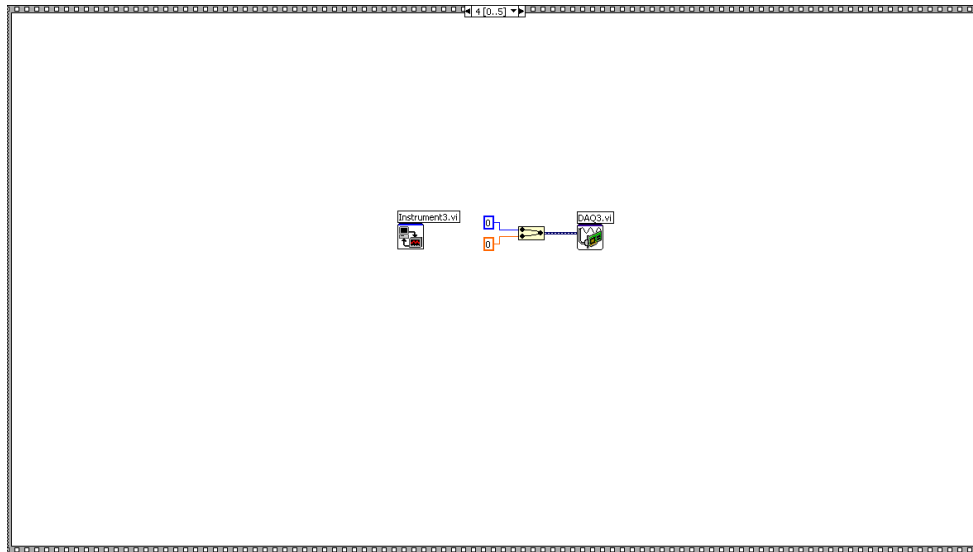
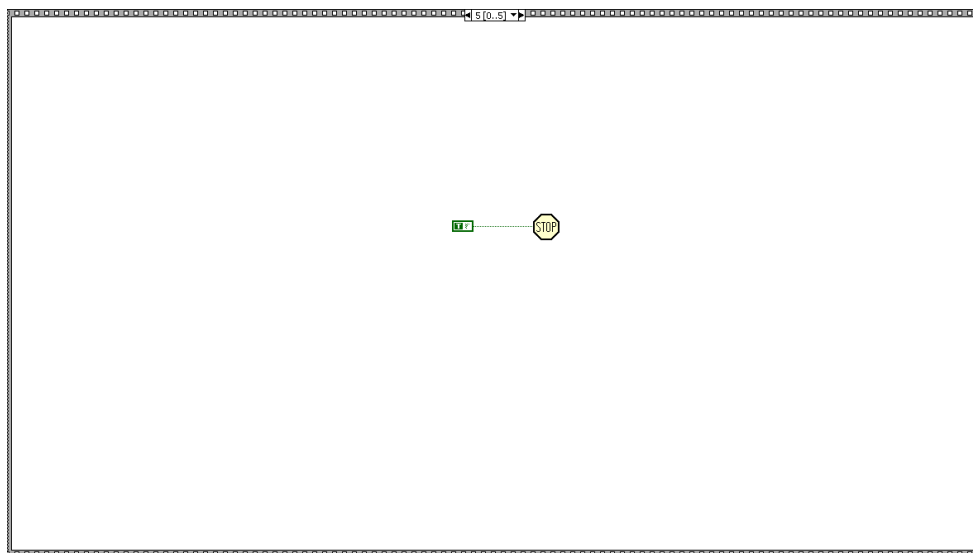


8.3. Barrido_Focus_y_Energy3.vi

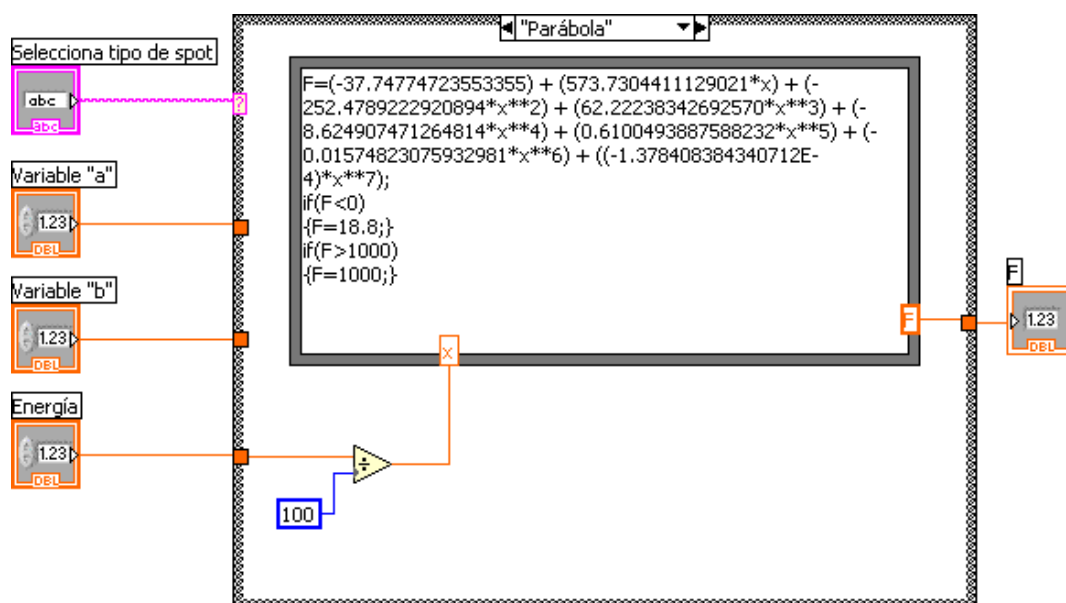
Vista general de la aplicación con la Etapa 3 y sus Pasos.



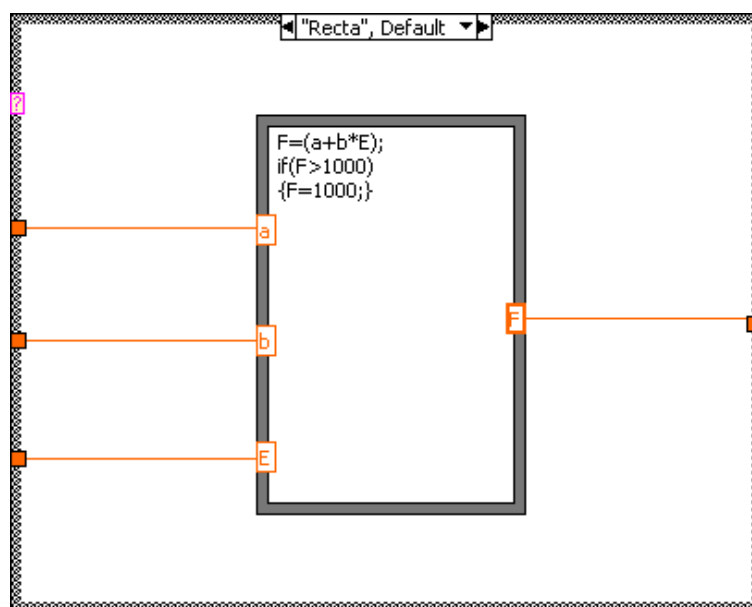
*Etapa 1**Etapa 2**Etapa 4*

*Etapa 5**Etapa 6*

8.4. Subprograma formulaRyP.vi



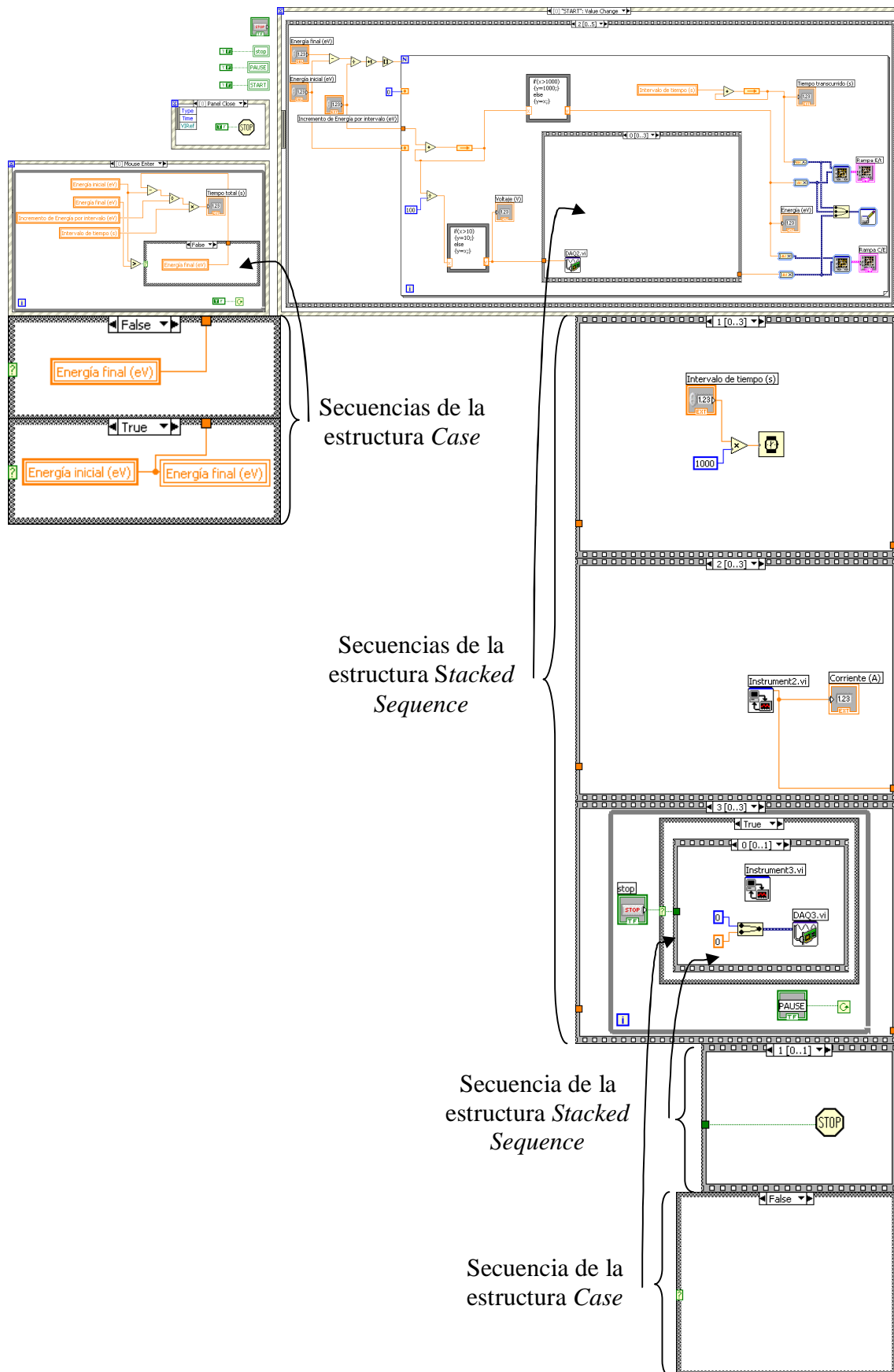
Ecuación de la Parábola

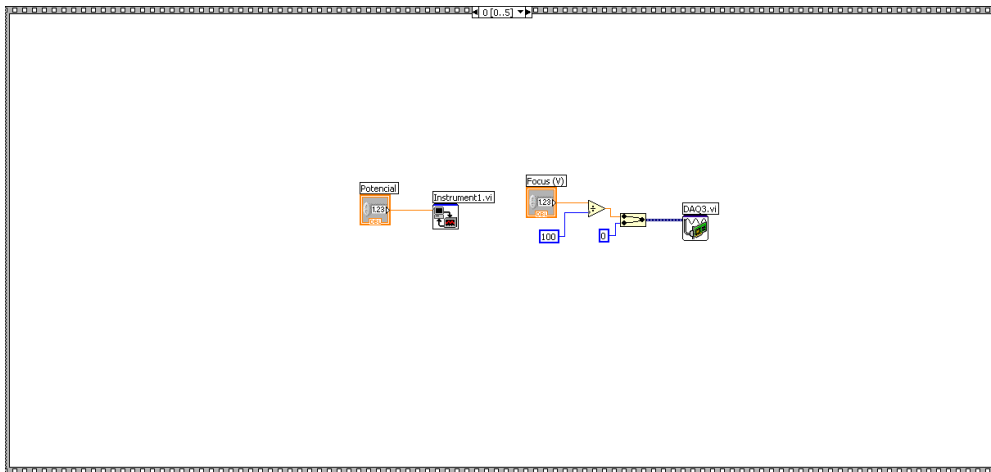
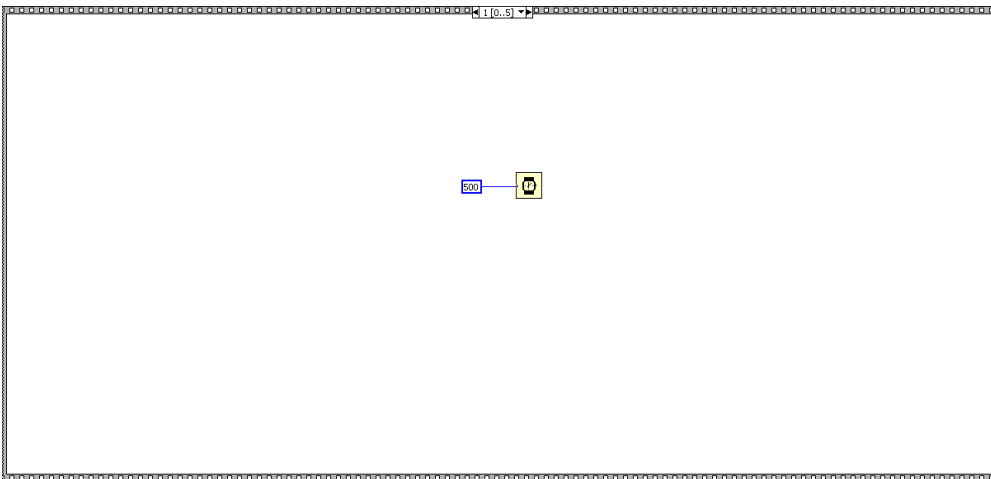
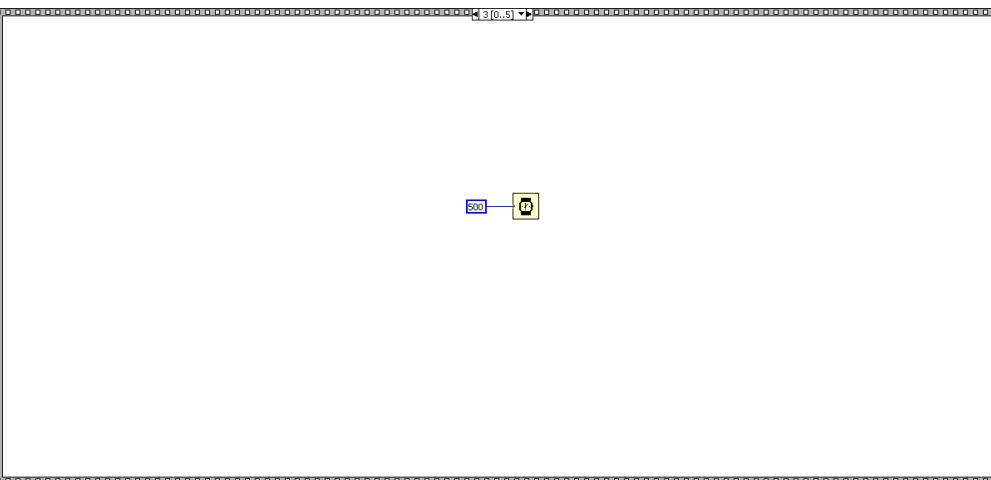


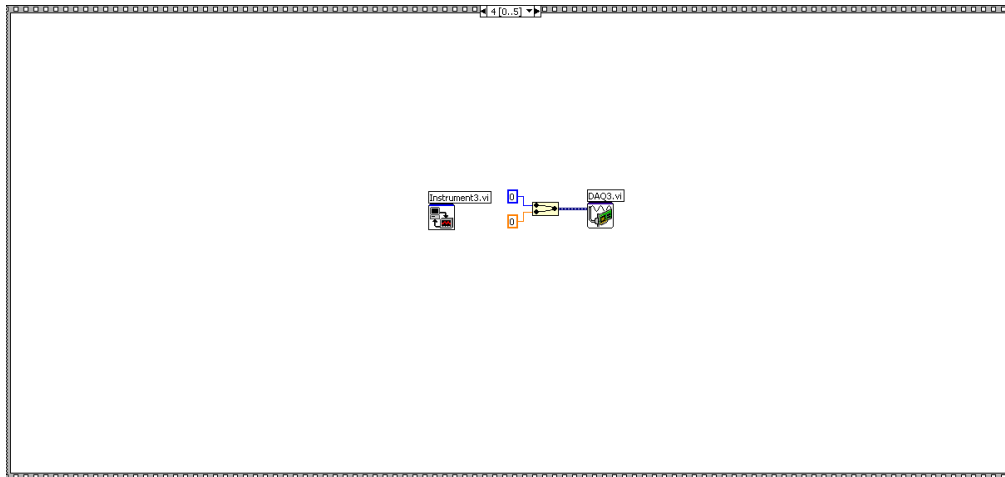
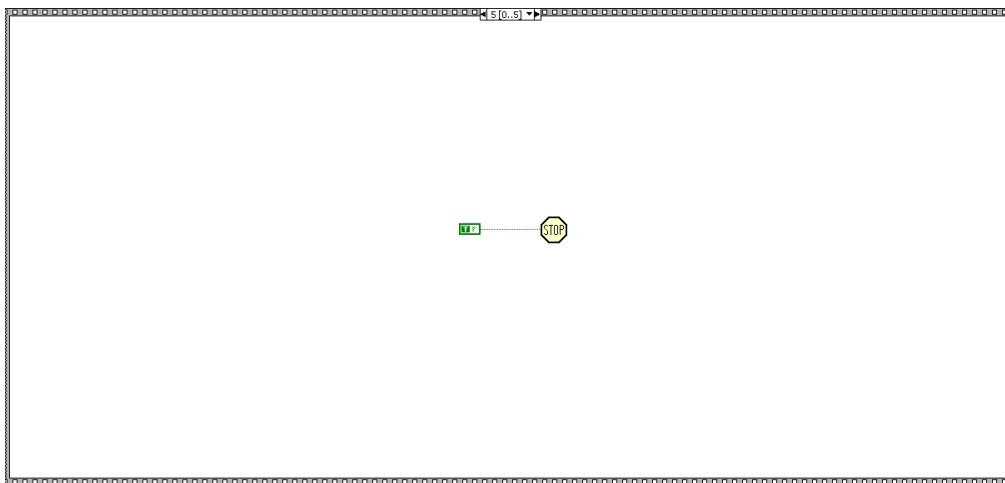
Ecuación de la Recta $F=(a+bE)$

8.5. Barrido de Energy con Focus_cte3.vi

Vista general de la aplicación con la Etapa 3 y sus Pasos.

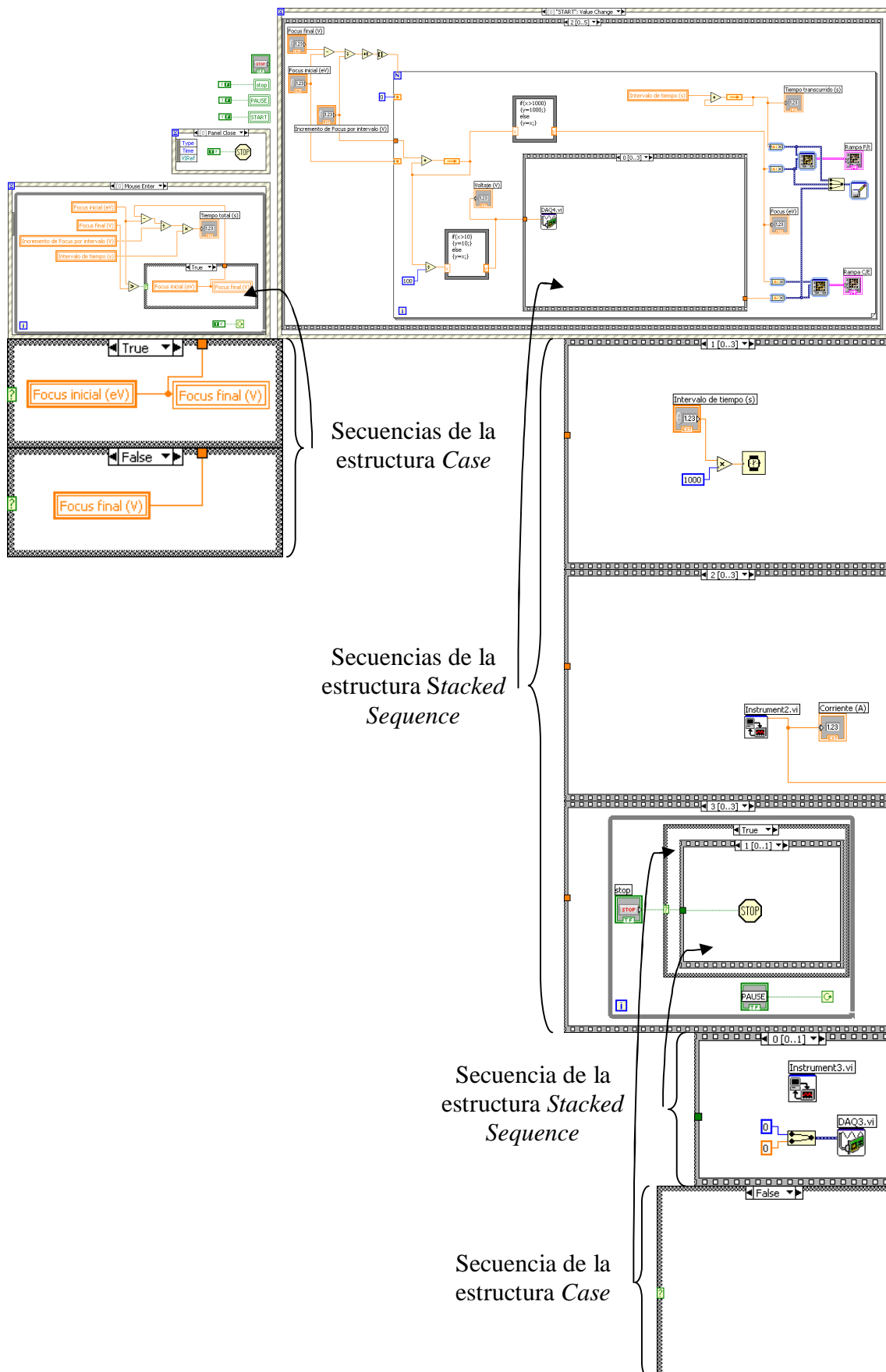


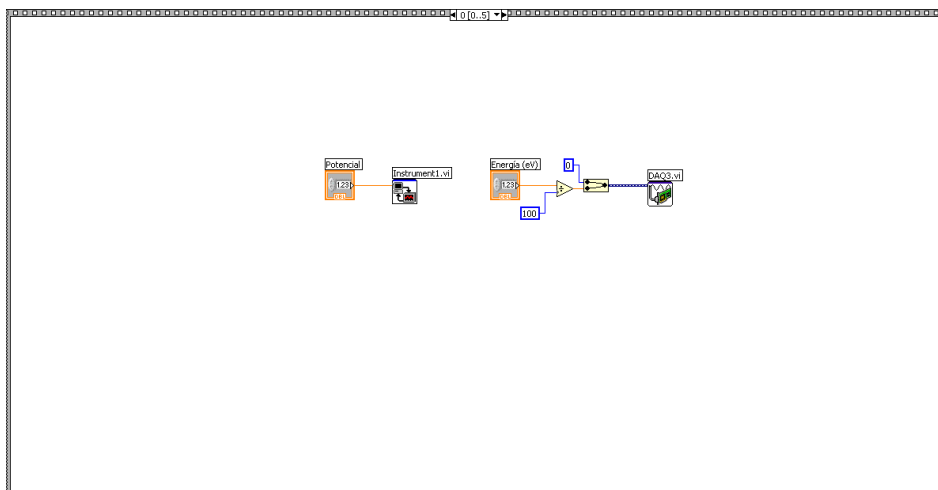
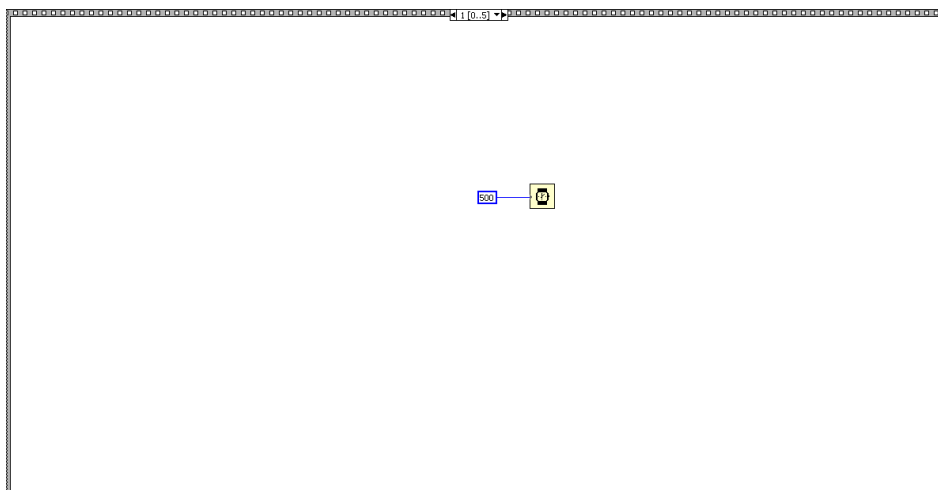
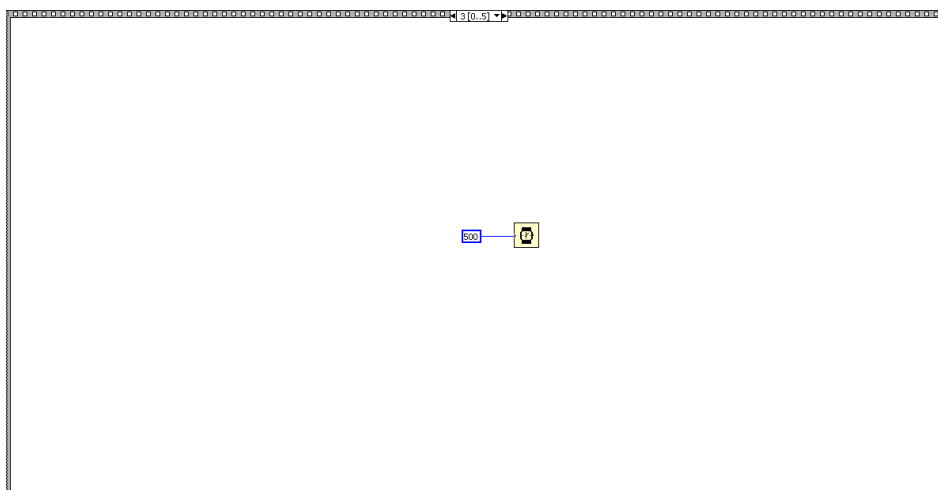
*Etapa 1**Etapa 2**Etapa 4*

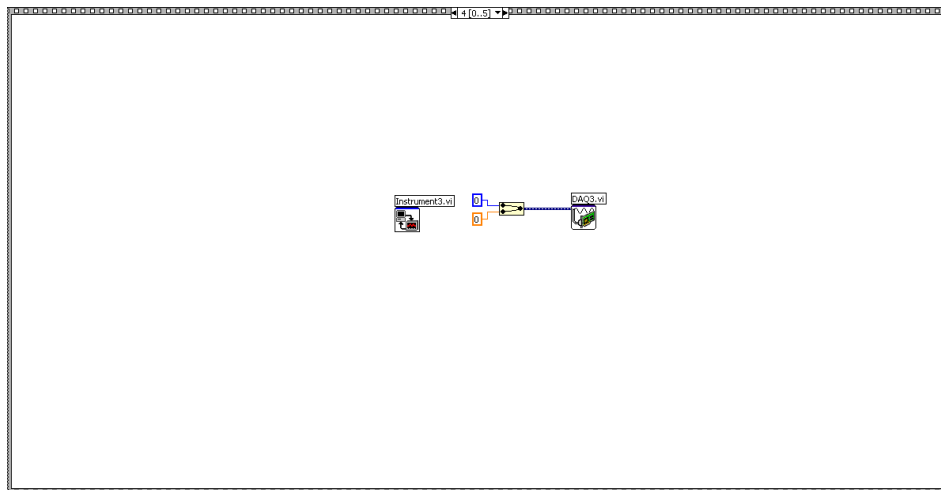
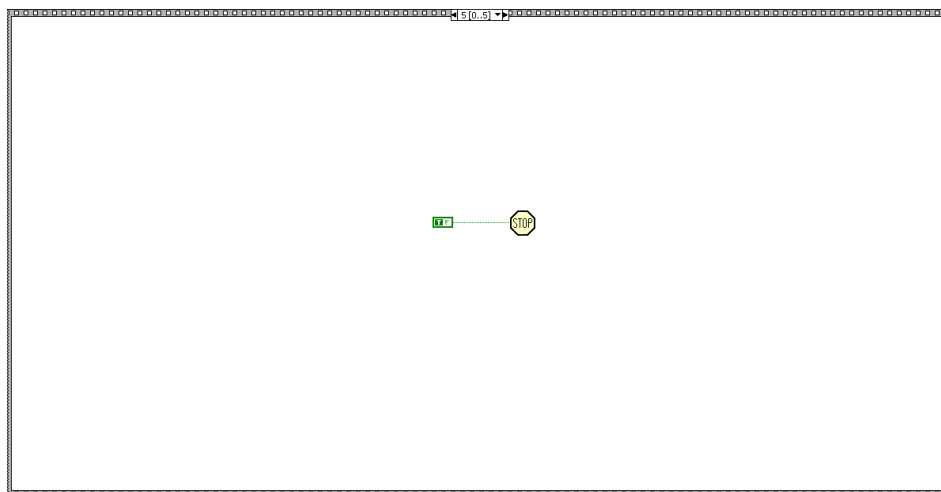
*Etapa 5**Etapa 6*

8.6. Barrido_Focus_con_Energy_cte3.vi

Vista general de la aplicación con la Etapa 3 y sus Pasos.



*Etapa 1**Etapa 2**Etapa 4*

*Etapa 5**Etapa 6*

8.7. Modificación del programa. Versión 1.1.

Una vez finalizada la puesta a punto del programa nos hemos encontrado con la situación de que el usuario podría introducir un valor de paso de Energía superior a la diferencia entre la Energía final y la Energía inicial. Para corregir este problema hemos introducido una mejora en el programa original, de modo que en caso de que el usuario introduzca en el control *Incremento de Energía por intervalo* un valor de Energía superior a la diferencia entre la Energía final y la Energía inicial, el programa automáticamente ajustará ese valor al máximo permitido en ese momento, es decir, la diferencia entre la Energía final y la Energía inicial.

A continuación se muestra la mejora en el diseño que se ha realizado para permitir el ajuste anteriormente comentado.

